

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

CHARLES-ANDRÉ ROY

CARTOGRAPHIE VÉGÉTALE DU COL DE LA VALLÉE DE  
SVERDRUP, ÎLE D'ELLESMERE, AVEC LE NDVI MODIS  
ET ANALYSES DES CHANGEMENTS D'ÉCHELLES

DÉCEMBRE 2008

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## REMERCIEMENTS

Je désire remercier tous ceux et celles qui m'ont soutenu et encouragé au cours de mon projet de maîtrise qui est maintenant achevé après quelques années de persévérance et d'effort. J'aimerais spécialement remercier mon directeur de maîtrise, Denis Gratton, qui a su me donner de judicieux conseils aux moments opportuns afin de m'encourager à ne pas lâcher malgré les obstacles rencontrés. Je tiens également à remercier ma codirectrice, Esther Lévesque, de m'avoir transmis ses connaissances sur la végétation ainsi que sa passion du monde arctique. Enfin, je remercie ma compagne de vie, Émilie, qui a su me donner l'énergie nécessaire à l'accomplissement de mon mémoire dans mes moments de découragements.

## RÉSUMÉ

La cartographie et le suivi de la dynamique des écosystèmes végétaux dans l'Arctique sont essentiels pour comprendre et quantifier les changements climatiques. Parce que l'Arctique est un vaste territoire et que l'envoi d'équipes de chercheurs coûte cher en raison de son éloignement, l'utilisation de données satellitaires couvrant de grands territoires devient un outil intéressant pour la cartographie et le suivi de la distribution de la végétation arctique. L'indice de végétation normalisé (NDVI) est l'un des indices de végétation les plus utilisés pour la cartographie végétale partout dans le monde. Toutefois, certaines études ont montré que le NDVI était dépendant de l'échelle spatiale à cause de la présence de surfaces hétérogènes et du couvert de roche, rendant la relation entre le NDVI et le recouvrement végétal en pourcentage non linéaire. Ces incertitudes quant à la dépendance du NDVI de l'échelle spatiale et à la non linéarité du NDVI vis-à-vis du recouvrement végétal en pourcentage ont amené certains auteurs à étudier l'indice de végétation d'échelle (SDVI) par rapport aux changements d'échelles (changements de résolutions spatiales).

Dans cette étude, nous examinons les effets de changements d'échelles de deux indices de végétation (NDVI et SDVI) entre une image à résolution fine ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) à 15 mètres et une image à résolution moyenne MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) à 250 mètres. L'objectif principal est d'effectuer une cartographie végétale du col de la vallée de Sverdrup, sur l'île d'Ellesmere au Canada, avec MODIS en utilisant l'indice de végétation ayant le moins d'effets de changements d'échelles.

Nos résultats indiquent que dans un environnement hétérogène arctique, la relation entre le NDVI MODIS tend à être linéaire avec le recouvrement végétal en pourcentage lorsque le recouvrement végétal en pourcentage est supérieur à 10 %. Par contre, la non linéarité est particulièrement forte sous 10% de recouvrement végétale, où l'impact des autres couverts (roche, neige, glace, ombre, banquise) est trop important pour que le NDVI MODIS détecte adéquatement la végétation. Notre analyse démontre que le SDVI MODIS est fortement non linéaire avec le recouvrement végétal en pourcentage, peu importe le pourcentage. Le SDVI n'est pas un indice de végétation bien adapté avec l'utilisation d'une image à résolution moyenne telle que MODIS pour un environnement arctique, où la végétation est clairsemée et n'est que de quelques centimètres de hauteur. Le NDVI MODIS est donc un outil robuste pour la cartographie de la végétation d'un environnement arctique comportant plusieurs surfaces hétérogènes. Notre cartographie végétale du NDVI MODIS montre bien les endroits à hautes concentrations de végétation ainsi que les probabilités de retrouver trois types de végétation (sèche – *Salix arctica*, mésique – *Dryas integrifolia*, humide – *Carex aquatilis*) le long du col de la vallée de Sverdrup.

# TABLE DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>ii</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>iii</b>
<b>TABLE DES MATIÈRES.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>vii</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>viii</b>
<b>CHAPITRE 1      INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction générale .....	1
1.2 Problématique .....	3
1.3 Objectifs .....	4
1.3.1 Objectif général.....	4
1.3.2 Objectifs spécifiques .....	4
<b>CHAPITRE 2      REVUE DE LITTÉRATURE.....</b>	<b>5</b>
2.1 L'indice de végétation normalisé (NDVI) .....	5
2.2 Concept de pixel mixte.....	6
2.3 Les changements d'échelles.....	7
2.4 Le NDVI et les changements d'échelles .....	9
2.5 L'indice de végétation d'échelle (SDVI) .....	11
2.6 Cartographies végétales en Arctique par télédétection .....	12

<b>CHAPITRE 3</b>	<b>MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>17</b>
3.1	Localisation et géomorphologie de la zone d'étude.....	17
3.2	Types d'image satellite utilisés et traitement des images .....	19
3.2.1	Présentation des images satellites .....	19
3.2.2	Calculs des réflectances exo-atmosphériques pour ASTER et MODIS et les corrections atmosphériques.....	19
3.3	Données de référence acquises sur le terrain .....	21
3.3.1	Présentation des données de référence acquises sur le terrain .....	21
3.3.2	Gradient d'humidité du sol et les classes des trois types de végétation .....	24
3.4	Calculs de variables et cartographies végétales à l'échelle de ASTER .....	28
3.4.1	Relation entre les données végétales de référence et le NDVI ASTER (calcul du recouvrement végétal en pourcentage).....	28
3.4.2	Détermination des seuils et cartographies des types de végétation avec le NDVI ASTER et le SDVI ASTER .....	30
3.5	Analyses des changements d'échelles.....	33
3.6	Cartographie végétale avec le NDVI MODIS .....	35
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>RÉSULTATS .....</b>	<b>36</b>
4.1	Calculs des variables et cartographies végétales à l'échelle ASTER .....	36
4.1.1	Relation entre les données végétales de référence et le NDVI ASTER .....	36
4.1.2	Détermination des seuils des types de végétation avec le NDVI ASTER et le SDVI ASTER .....	40
4.1.3	Cartographies végétales du NDVI ASTER et du SDVI ASTER.....	42

4.2 Analyses des changements d'échelles.....	45
4.2.1 Relation entre le recouvrement végétal en pourcentage et ASTER à l'échelle MODIS (image ASTER-MODIS).....	45
4.2.2 Relation entre le recouvrement végétal en pourcentage et MODIS.....	48
4.3 Cartographie végétale avec le NDVI MODIS .....	49
<b>CHAPITRE 5      DISCUSSION .....</b>	<b>53</b>
5.1 Calculs des variables et cartographies végétales à l'échelle de ASTER.....	53
5.2 Analyses des changements d'échelles.....	56
5.3 Cartographie végétale avec le NDVI MODIS .....	59
5.4 Application future .....	61
<b>CHAPITRE 6      CONCLUSION .....</b>	<b>63</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>66</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>71</b>

# LISTE DES TABLEAUX

2.1	Comparaison entre Landsat et MODIS. Les classes sont issues du regroupement des estimations calculées avec la méthode de décomposition spectrale. La diagonale centrale représente la précision par classe avec laquelle MODIS a estimé la même classe que Landsat. Classe tundra : 100% de tundra; classe 0-0.25 : 0 à 25% de taïga; classe 0.25-0.5 : 25 à 50% de taïga; classe 0.5-0.75 : 50 à 75% de taïga; classe taïga : 100% de taïga. Tiré de Ranson <i>et al.</i> (2004) .....	14
3.1	Similitudes spectrales en terme de NDVI ASTER des classes végétales de Bergeron (1988). Le NDVI ASTER correspond à la moyenne des valeurs des pixels calculée sur la surface couverte par chacune des classes végétales .....	27
3.2	Association entre les classes de Bergeron (1988) et les types de végétation de notre étude. Les lettres réfèrent aux classes de la classification de Bergeron (1988) présentées à la figure 3.2 .....	27
4.1	Matrices de correspondance entre les classes de Bergeron (1988) déterminées par un échantillonnage sur le terrain et les classifications végétales produites à partir des indices de végétation, le NDVI ASTER en (A) et le SDVI ASTER en (B) .....	41
4.2	Comparaison des cartographies du NDVI ASTER et du SDVI ASTER par une matrice de correspondance .....	45
4.3	Classes des recouvrements végétaux agrégés en pourcentage de la cartographie végétale produite avec le NDVI MODIS de la figure 4.11 .....	51



## LISTE DES FIGURES

2.1	Schéma représentant le processus de changement d'échelle (Hay <i>et al.</i> , 2001) .....	8
2.2	Isolignes du SDVI représentant la disposition du couvert végétal par rapport à la « ligne de la roche » (Jiang <i>et al.</i> , 2006).....	12
2.3	Cartographie de la végétation de l'ensemble de l'Arctique au 1 : 7 500 000 effectué par l'équipe du CAVM (Circumpolar Arctic Vegetation Map) en utilisant une image AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) (CAVM, 2003).....	16
3.1	Image ASTER montrant le col de la vallée de Sverdrup (Earth Observing System Data Gateway - NASA, 2005). Vignette du haut : Localisation du col de la vallée sur l'île d'Ellesmere (Atlas du Canada – Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2006) .....	18
3.2	Carte détaillée de la végétation du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere, selon l'étude de terrain de Bergeron (1988) .....	23
3.3	Gradient conceptuel de l'humidité du sol selon les effets topographiques (Walker <i>et al.</i> , 2002).....	25
3.4	Localisation des sites d'échantillonnage de Bergeron (1988). Les chiffres représentent les sites d'échantillonnage utilisés par notre étude .....	29
3.5	Masque (les zones gris foncé) utilisé pour la correspondance entre la carte détaillée de la zone d'étude de Bergeron (1988) et le NDVI ASTER. Les zones 1 indiquent des polygones de végétation sèche- <i>Salix arctica</i> , les zones 2 des polygones de végétation mésique- <i>Dryas integrifolia</i> et les zones 3 des polygones de végétation humide- <i>Carex aquatilis</i> .....	32
4.1	Relation entre le NDVI ASTER et le recouvrement végétal en pourcentage définie par Bergeron (1988) pour ces sites d'échantillonnage, tels qu'identifiés à la figure 3.4. L'équation de la droite de régression utilisée pour le calcul du recouvrement végétal en pourcentage est $y = 247.47x - 4,5829$ .....	37
4.2	Relation entre le SDVI ASTER et le recouvrement végétal en pourcentage définie par Bergeron (1988) pour ces sites d'échantillonnage, tels qu'identifiés à la figure 3.4 .....	38

4.3	Répartition du recouvrement végétal en pourcentage de l'image ASTER le long du col de la vallée de Sverdrup .....	39
4.4	Cartographie végétale produite avec le NDVI ASTER du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere .....	43
4.5	Cartographie végétale produite avec le SDVI ASTER du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere .....	44
4.6	Analyse de régression linéaire entre le NDVI ASTER-MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé .....	47
4.7	Analyse de régression linéaire entre le SDVI ASTER-MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé .....	47
4.8	Analyse de régression linéaire entre le NDVI MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé. La ligne rouge est la droite de régression linéaire entre les deux variables et dont la formule est la suivante : $y = 2,4345x - 0,2242$ .....	48
4.9	Analyse de régression linéaire entre le SDVI MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé .....	49
4.10	Progression des proportions des types de végétation selon le recouvrement végétal en pourcentage .....	50
4.11	Cartographie végétale produite avec le NDVI MODIS du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere .....	52
5.1	Cartographie végétale produite avec le NDVI MODIS du parc Quttinirpaaq, île d'Ellesmere. ....	62

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

### 1.1 Introduction générale

L'Arctique est caractérisé par des extrêmes tels que des températures hivernales très froides, la dominance du couvert de neige ainsi que des taux de précipitations relativement faibles, tous résultant de sa position géographique (Hinzman *et al.*, 2005). Des modélisations numériques du climat montrent que l'Arctique sera la région mondiale la plus touchée par les effets du réchauffement climatique (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – GIEC, 2008). Les changements de la température de l'air, de la profondeur du mollisol, d'humidité du sol, hydrologiques et du flux de nutriments perturberont l'équilibre de la végétation en termes de structure, de productivité, de diversité et de distribution des espèces (Walker *et al.*, 2005). La distribution actuelle ainsi que l'évolution de la végétation face à ces changements devront être étudiés.

Depuis 1920 (Stow *et al.*, 2004), l'interprétation de photographies aériennes est la méthode traditionnelle pour l'étude des différentes couvertures ou utilisations du sol (Hudak et Wessman, 1998). L'avènement de la télédétection à partir d'images satellites date de 1972 avec le lancement du satellite Landsat muni du capteur *Multispectral Scanner* (Stow *et al.*, 2004). Les approches traditionnelles de cartographies de la végétation sont basées sur des campagnes de terrain et sont limitées par le besoin d'engager une grande quantité de main-d'œuvre pour échantillonner (Gong *et al.*, 1994). Or, ces inconvénients sont d'autant plus importants lorsque la région à cartographier est éloignée, comme les régions arctiques. En outre, la fréquence, non régulière et rare, des observations en avion pour des photographies aériennes est contrainte par des difficultés

logistiques, notamment le climat et les coûts, dans les régions arctiques (Hirata *et al.*, 2001; Stow *et al.*, 2004). Les débuts de la télédétection par images satellites ont ouvert la possibilité d'effectuer des cartographies à distance. La télédétection s'avère un outil très utile pour la cartographie des ressources naturelles des régions éloignées, telles que la végétation. Afin d'obtenir de l'information sur la végétation aride ou semi-aride à une échelle régionale en peu de temps, la télédétection par images satellites est une technologie efficace (Hurcom et Harrison, 1998).

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est l'un des indices de végétation le plus utilisé pour la cartographie végétale. Certaines études (Price, 1990; Baret *et al.*, 1995; Liu et Huete, 1995; Chen, 1999; Leprieur *et al.*, 2000; Jiang *et al.*, 2006) ont montré quelques problèmes quant à son utilisation. En effet, normalement les valeurs de NDVI donnent la proportion de végétation présente dans chaque pixel. Les valeurs de NDVI et le recouvrement végétal en pourcentage (proportion de végétation dans un pixel) sont liés ensemble par une relation linéaire. Mais ces études montrent que le NDVI est dépendant de l'échelle spatiale et que l'utilisation d'images avec des résolutions spatiales différentes, appelées changements d'échelles, génère des erreurs au point où les deux images ne sont plus comparables entre elles. Ceci rend la relation entre les valeurs de NDVI et le recouvrement végétal en pourcentage non linéaire. Ces incertitudes ont amené certains auteurs à étudier un autre indice, l'indice de végétation d'échelle (SDVI), qui est, contrairement au NDVI, indépendant des changements d'échelles (Jiang *et al.*, 2006).

Les erreurs associées à la relation entre le NDVI et le recouvrement végétal en pourcentage et aux changements d'échelles ont été peu étudiées dans l'Arctique. L'objectif de ce mémoire est de valider l'utilisation de deux indices de végétation, le NDVI et le SDVI (Scaled Difference Vegetation Index), comme outils pour la cartographie végétale d'un environnement arctique avec une image à résolution moyenne de 250 mètres MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer).

## 1.2 Problématique

L'intérêt pour la cartographie végétale en Arctique se manifeste de façon importante que depuis quelques années. Cet engouement pour la cartographie végétale en Arctique est dû en grande partie au réchauffement climatique que subira cette région au cours du prochain siècle. Il n'est toutefois pas clair comment l'écosystème arctique se comportera face aux changements climatiques qui le menace (Laidler et Treitz, 2003) en raison du peu d'études qui s'y sont réalisées jusqu'à maintenant. Il y a quelques années, le gouvernement du Canada a créé quelques parcs dans les îles arctiques canadiennes, dont Sirmilik, Auyuittuq et Quttinirpaaq. Ce dernier, officiellement créé en 2000 comme parc national, est situé sur la portion nord de l'île d'Ellesmere à plus de 84° Nord et couvre plus de 37 775 km<sup>2</sup>. Le gouvernement du Canada désire faire une cartographie de la végétation sur cet immense territoire. L'image satellite la plus précise disponible, sans recourir à une mosaïque pour couvrir l'ensemble du territoire, est MODIS.

L'île d'Ellesmere est principalement couverte par des déserts polaires avec très peu de végétation. Au fond de quelques vallées, des conditions d'humidité et de température favorables permettent le développement de la végétation dans des endroits appelés oasis polaire (Batten et Svoboda, 1994). La vallée du col de Sverdrup sur l'île d'Ellesmere (Canada) a été utilisée comme site témoin. La répartition spatiale de la végétation est bien connue suite à la cartographie végétale réalisée à l'échelle du 1 : 12 500 sur ce territoire par Bergeron (1988). Cette cartographie par Bergeron (1988) constitue les données de terrain de référence permettant de valider l'image à résolution fine ASTER, qui, par la suite, permettra de valider l'image à résolution moyenne MODIS.

## 1.3 Objectifs

### **1.3.1 Objectif général**

- Produire une cartographie de la végétation de la vallée du col de Sverdrup sur l'île d'Ellesmere, au Canada, à partir de l'utilisation d'un indice de végétation appliqué à une image à résolution moyenne MODIS.

### **1.3.2 Objectifs spécifiques**

- Étudier la relation entre la cartographie de Bergeron (1988) et ASTER.
- Produire une cartographie avec chacun des indices de végétation, NDVI et SDVI, et décrire les différences entre les deux.
- Valider les changements d'échelles entre ASTER et MODIS, soit la linéarité de la relation entre les indices de végétation (NDVI et SDVI) et le recouvrement végétal en pourcentage.

## CHAPITRE 2

### REVUE DE LITTÉRATURE

#### 2.1 L'indice de végétation normalisé (NDVI)

Au cours des dernières décennies, plusieurs types d'indice de végétation ont été développés pour faciliter la détection de la végétation par rapport à d'autres types de couvert comme la roche, la neige et le sol. Les indices de végétation sont obtenus à l'aide d'une combinaison de plusieurs bandes spectrales. Les valeurs de ces indices donnent la proportion (recouvrement végétal) de végétation présente dans chaque pixel (Verstraete et Pinty, 1991). Parmi ces nombreux indices, l'un des plus utilisés est l'indice de végétation normalisé (NDVI) représenté par la formule suivante :

$$\text{NDVI} = (\text{PIR} - \text{R}) / (\text{PIR} + \text{R}) \quad (2.1)$$

où PIR représente les valeurs de réflectance spectrale de la bande du proche infrarouge et R celles de la bande du rouge.

Le concept du NDVI repose sur le fait qu'un couvert végétal absorbe l'énergie dans la bande du rouge par la chlorophylle de la plante et réfléchit beaucoup dans la bande du proche infrarouge (Robin, 2002). L'élément intéressant avec l'utilisation de ces bandes est qu'elles permettent un contraste élevé au niveau des propriétés optiques entre la roche et la végétation (Baret *et al.*, 1995). Ce contraste est utile pour l'estimation de la proportion de végétation. Les valeurs de NDVI pour la végétation sont plus élevées que celles pour les zones non végétales (neige, eau, glace, roche). En théorie, les valeurs de NDVI pour la végétation tendent vers 1 tandis que celles des zones non végétales

tendent vers -1. Ainsi, plus la proportion de végétation décroît, plus les valeurs de réflectance du rouge tendent à décroître linéairement (Beck *et al.*, 2006), faisant en sorte que la relation entre les recouvrements végétaux en pourcentage et les valeurs du NDVI est linéaire.

L'utilisation du NDVI comme indice de végétation tend à réduire les effets d'éclairement ou de pente, c'est-à-dire d'atténuer les effets d'ombrage occasionnés par la topographie, permettant ainsi d'analyser les recouvrements végétaux de manière quasi indépendante du relief (Calloz et Collet, 2001). Le NDVI a de plus démontré une sensibilité intéressante aux couverts peu denses (Calloz et Collet, 2001).

## 2.2 Concept de pixel mixte

Un concept important en télédétection est celui de pixel mixte (surfaces hétérogènes). Le rayonnement réfléchi de la surface d'un pixel tel qu'observé en télédétection provient rarement d'un seul matériel homogène, car les surfaces naturelles composées d'un seul matériel uniforme (surfaces homogènes) existent très peu dans la nature (Van der Meer et De Jong, 2000). En effet, les pixels sont rarement composés d'un seul et unique type de couvert, et ce, particulièrement dans des environnements arides et semi-arides, tels que les régions arctiques, puisque la répartition de la végétation est très variable et clairsemée (Elmore *et al.*, 2000).. Le pixel mixte regroupe ainsi différents types de couverts (végétation, roche, eau, sol, neige, glace, etc.) en proportions variables selon le type de couvert présent dans un pixel. Le mélange de ces couverts contribue à donner une réponse spectrale unique pour chaque pixel.



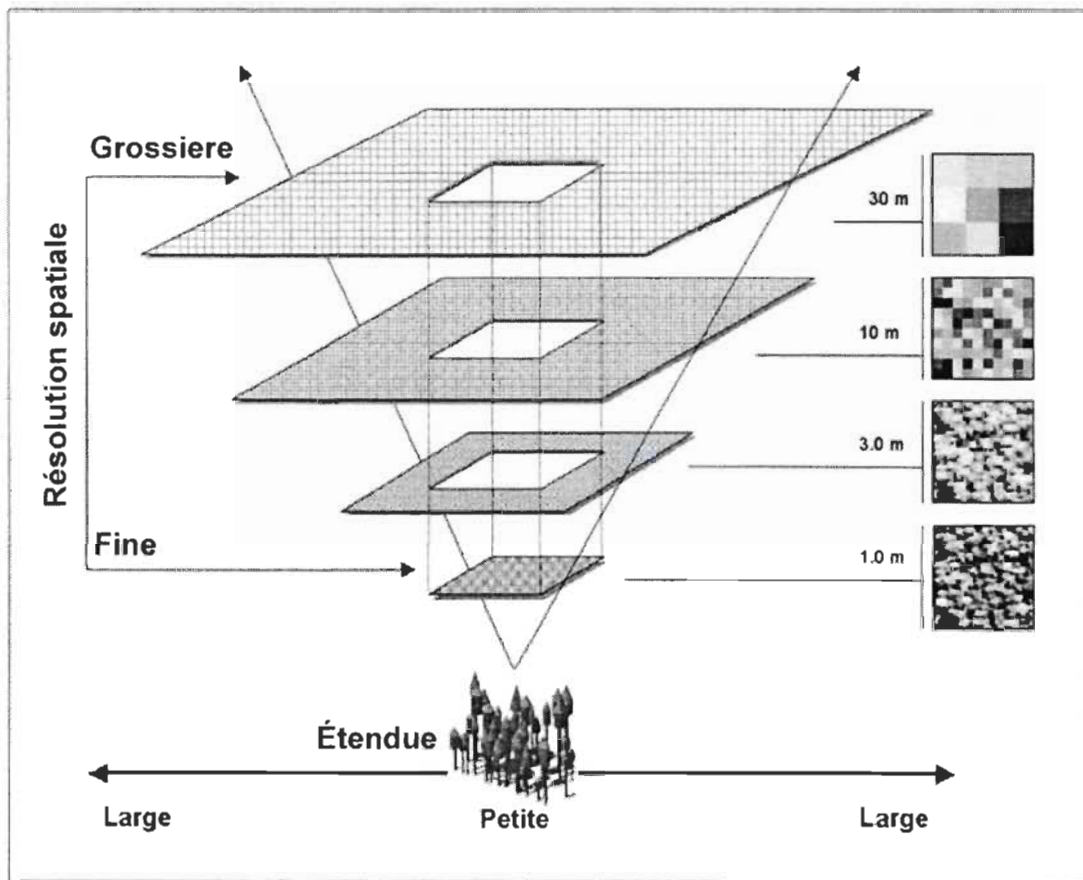
Il est souvent difficile d'évaluer les proportions des différents couverts car chaque couvert possède ses propres caractéristiques spectrales, spatiales et radiométriques. L'intégration est représentée par une valeur unique du pixel qui donne généralement peu d'information sur son contenu réel (Price, 2003). Enfin, de vouloir quantifier les proportions des couverts induit généralement des erreurs (Chen, 1999).

## 2.3 Les changements d'échelles

Plusieurs types de capteurs en orbite autour de la terre offrent des résolutions spatiales allant de quelques mètres jusqu'à plusieurs kilomètres. Puisque l'utilisation de plusieurs capteurs de différentes résolutions spatiales dans une même étude n'est pas rare en télédétection, il est alors inévitable de devoir composer avec des changements d'échelles. Le changement d'échelle peut être de deux types (Girard et Girard, 2004) : 1) ascendant (ou agrégation), qui consiste à agréger l'information d'une image à une résolution fine vers une résolution plus grossière ou 2) descendant (ou décomposition), qui consiste à décomposer l'information globale d'un pixel à résolution grossière en ses éléments constitutifs à résolution plus fine. Lors de l'agrégation, le nombre d'unité spatiale (pixels) est réduit (Bian et Butler, 1999). Chaque nouvelle unité (pixel) représente désormais une surface plus grande que l'unité originale et vice-versa lors de la décomposition (Figure 2.1).

Chaque image est caractérisée par une échelle (résolution spatiale) et un niveau d'agrégation (Hay *et al.*, 2001), qui déterminent le type d'information pouvant être extrait de manière visuelle. Plus la résolution est grossière, plus l'information sur les couverts est difficilement discernable, car plus le phénomène de pixel mixte est important (Gong *et al.*, 1994). À résolution fine, les textures et les formes caractérisant les couverts sont généralement reconnaissables, ce qui facilite l'identification des

couverts (Price, 2003). L'information sur les couverts ayant de faibles proportions, comme la végétation arctique par exemple, tend à disparaître plus facilement avec l'augmentation de la résolution spatiale (Turner *et al.*, 1989). Le territoire peut donc apparaître homogène à certaines échelles, mais hétérogène à d'autres (Bian et Walsh, 1993).



**FIGURE 2.1 :** Schéma représentant le processus de changement d'échelle (Hay *et al.*, 2001).

## 2.4 Le NDVI et les changements d'échelles

Plusieurs études se sont intéressées aux effets des changements d'échelles en lien avec le NDVI (Price, 1990; Aman *et al.*, 1992; Baret *et al.*, 1995; Liu et Huete, 1995; Chen, 1999; Leprieur *et al.*, 2000; Price, 2003; Jiang *et al.*, 2006). Ces chercheurs ont étudié les effets des changements d'échelles à travers la comparaison entre des images à résolutions fines et des images à résolutions grossières dans le but de savoir si la relation linéaire est conservée entre les valeurs de NDVI et les valeurs de recouvrement végétal en pourcentage lors du changement d'échelle. Les résultats obtenus de ces études ne démontrent pas clairement l'impact des changements d'échelles sur la relation entre le NDVI et le recouvrement végétal en pourcentage.

L'étude de Aman *et al.* (1992) a analysé la correspondance entre le NDVI calculé à partir de la moyenne des réflectances et le NDVI intégré à partir de NDVI individuels en simulant une image AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de 1 kilomètre de résolution à partir d'images à résolution fine SPOT (Satellites Pour l'Observation de la Terre) 1 HRV (Haute Résolution Visible) à 20 mètres et Landsat TM à 30 mètres. Leurs résultats montrent une forte corrélation entre les deux types de NDVI calculés pour deux environnements, en Afrique de l'Ouest tropical et en France tempérée. Aman *et al.* (1992) concluent que le NDVI dérivé d'un capteur à résolution grossière peut être utilisé au lieu d'un NDVI agrégé à partir d'une résolution fine sans introduire d'erreurs significatives sur la relation entre le NDVI et le recouvrement végétal en pourcentage.

D'autres études ont démontré que la contribution au signal NDVI par les couverts non végétaux, comme la roche et la neige, rend la relation entre le NDVI et les propriétés biophysiques des plantes (e.g. le recouvrement végétal en pourcentage) instables (Liu et Huete, 1995). Toutes les études s'entendent pour dire que les problèmes

reliés aux changements d'échelles sont causés par la présence de surfaces hétérogènes (pixels mixtes). Chen (1999) et Leprieur et al. (2000) ont montré que le NDVI d'une image AVHRR à 1 km de résolution spatiale avait une relation non linéaire avec le recouvrement végétal en pourcentage. Selon eux, les erreurs générées sont dues à la discontinuité qui existe entre divers types de couverts contrastants, en terme de luminosité des couverts à l'intérieur d'un pixel mixte. Jiang *et al.* (2006) s'est intéressé à la correspondance entre les valeurs du NDVI d'une image théorique à résolution grossière et les valeurs de NDVI d'une image à résolution fine. Leurs résultats montrent qu'en présence de surfaces hétérogènes, la résolution spatiale a un impact important sur les mesures de NDVI et que des NDVI de diverses échelles ne sont pas toujours comparables entre eux. Les valeurs de réflectance de surfaces identiques dans un même endroit géographique peuvent être sous-estimées ou surestimées d'une image à l'autre (Chen, 1999; Jiang *et al.*, 2006).

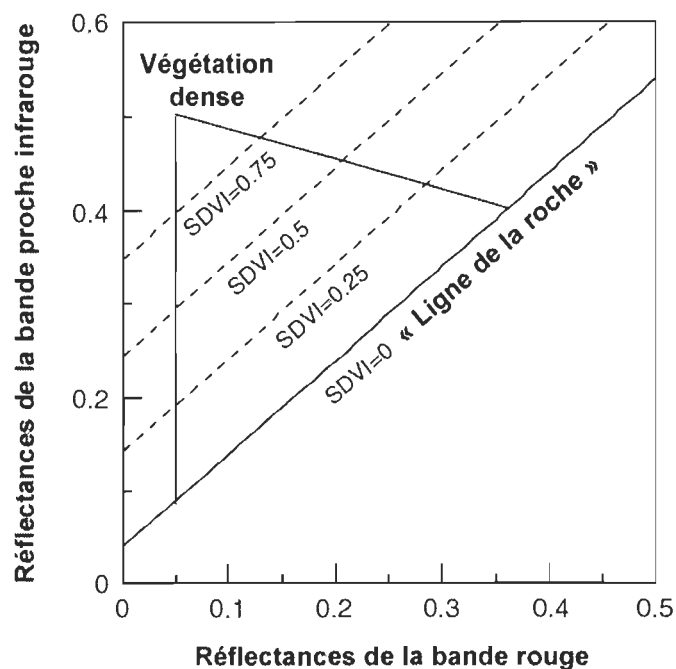
Le couvert de roche est celui qui se mélange en plus grande proportion avec la végétation. Ce couvert est celui qui génère le plus d'erreurs, car le NDVI ne corrige pas efficacement les effets de la roche (Baret *et al.*, 1995). Plusieurs études (Liu et Huete, 1995; Chen, 1999; Jiang *et al.*, 2006) démontrent que la luminosité variable du fond de scène comme la roche peut produire de grandes variations au niveau des valeurs de NDVI d'une image à l'autre. Lorsque le couvert végétal est clairsemé et de faibles proportions, l'impact de la réponse spectrale de la végétation sur le signal est plutôt faible par rapport aux autres couverts (Leprieur *et al.*, 2000).

## 2.5 L'indice de végétation d'échelle (SDVI)

L'indice de végétation d'échelle (SDVI) varie indépendamment des changements d'échelles et du couvert de la roche Jiang *et al.* (2006). Le SDVI se calcule comme suit :

$$SDVI = (DVI - DVI_r) / (DVI_v - DVI_r) \quad (2.2)$$

où DVI est la différence entre les bandes du proche infrarouge et du rouge (PIR – R), DVI<sub>r</sub> est une valeur unique pour l'ensemble d'une image représentant un DVI de roche pure et DVI<sub>v</sub> une valeur unique pour l'ensemble d'une image représentant un DVI de végétation pure. Le principe du SDVI se base sur le concept de la « ligne de la roche » (Figure 2.2). La roche a tendance à former une ligne droite lorsque les réflectances du rouge sont représentées graphiquement par rapport aux réflectances du proche infrarouge. La diminution de la réponse de la bande du rouge de la roche suit la même diminution que la réponse de la bande du proche infrarouge (Girard et Girard, 2004). Les types de roche avec un taux d'humidité élevé se regroupent dans le bas de la ligne (roches d'une luminosité sombre) tandis que les types de roche avec un taux d'humidité faible se regroupent en haut de la ligne (roches d'une luminosité claire). Quant à elle, la végétation aura tendance à se situer au dessus de la ligne. Un SDVI de 0 correspond à l'absence de végétation (« ligne de la roche »), un SDVI de 1 égale un couvert dense et un couvert mixte se situe entre les deux. Le SDVI tente de soustraire l'effet perturbateur principal des changements d'échelles, la roche, de la réponse globale d'un pixel mixte, ceci afin d'être capable de détecter le couvert végétal.



**FIGURE 2.2 :** Isolignes du SDVI représentant la disposition du couvert végétal par rapport à la « ligne de la roche » (Jiang *et al.*, 2006).

## 2.6 Cartographies végétales en Arctique par télédétection

Afin de comprendre davantage la végétation arctique, la télédétection offre un grand nombre de capteurs, parmi lesquels quelques-uns ont été utilisés en Arctique tels que Landsat, MODIS et AVHRR. Le choix du capteur est important, car chaque capteur possède une résolution spatiale et une étendue (superficie couverte du territoire par l'image) différentes, lesquelles varient de manière opposée, c'est-à-dire que plus l'étendue couverte par une image est grande, plus la résolution de l'image sera grossière.

Malgré l'étendue réduite couverte par les images à résolution fine telle que Landsat, ces images sont idéales pour l'étude détaillée de la végétation. Ranson *et al.*

(2004) ont utilisé la méthode de décomposition spectrale<sup>1</sup> (« spectral unmixing ») afin de cartographier la zone de transition entre la taïga et la toundra en Russie avec une image à résolution fine Landsat à 30 mètres et une image à résolution grossière MODIS de 500 mètres. La cartographie des deux types de végétation pose un problème car la frontière qui les sépare n'est pas clairement définie, mais représente plutôt une zone mixte dans laquelle les deux se mélangent et où les pixels purs sont rares. Afin de valider les proportions de taïga et de toundra estimées avec Landsat et MODIS, Ranson *et al.* (2004) ont utilisé diverses sources de référence telles que des cartes historiques montrant la répartition de la végétation, des études récentes d'échantillonnage et des images IKONOS (résolution de 4 mètres). En plus d'appliquer la méthode de décomposition spectrale à l'image Landsat, Ranson *et al.* (2004) ont également fait une classification avec l'algorithme de maximum de vraisemblance<sup>2</sup>. Les résultats montrent que les deux méthodes permettent de cartographier avec une bonne précision la répartition de la taïga et de la toundra à l'échelle de Landsat. Pour sa part, MODIS à 500 m montre également des résultats intéressants (Tableau 2.1). En effet, lorsque la taïga et la toundra ne sont pas mélangées ensemble, MODIS est capable de les détecter avec de bonnes précisions, soit 96,5% et 60,4%, respectivement. Toutefois, lorsque les couverts sont mélangés, MODIS a plus de difficulté à séparer les classes (Ranson *et al.*, 2004). Une classification avec moins de classes pourrait probablement augmenter la précision et éviter la confusion entre ces classes mixtes. Cette étude montre que MODIS est un bon outil de cartographie pour les zones nordiques et permet, malgré certaines confusions pour les classes mixtes, d'estimer les couverts de taïga et de toundra sur de grands territoires.

---

<sup>1</sup> La décomposition spectrale se base sur le principe physique voulant que les valeurs des pixels, purs si homogènes (1 seul couvert) et mixtes si hétérogènes (plusieurs couverts), sont le résultat de la combinaison linéaire des signatures spectrales individuelles de chacun des couverts multipliés par leurs proportions respectives (Olthof *et al.*, 2007). La signature individuelle d'un couvert représente un domaine pur (« endmember »), soit une entité distincte qui n'est pas elle-même mélangée à un ou plusieurs autres couverts (Hurcom *et al.*, 1996). Un domaine pur est donc la moyenne des valeurs, soit en termes de réflectances ou d'indice de végétation, d'un ou plusieurs pixels d'un couvert particulier dont sa proportion à l'intérieur du ou des pixels est de 100%.

<sup>2</sup> Pour plus d'information sur le maximum de vraisemblance, consulter la référence de Kleinbaum *et al.* (1998).

**TABLEAU 2.1**

Comparaison entre Landsat et MODIS. Les classes sont issues du regroupement des estimations calculées avec la méthode de décomposition spectrale. La diagonale centrale représente la précision par classe avec laquelle MODIS a estimé la même classe que Landsat. Classe toundra : 100% de toundra; classe 0-0.25 : 0 à 25% de taïga; classe 0.25-0.5 : 25 à 50% de taïga; classe 0.5-0.75 : 50 à 75% de taïga; classe taïga : 100% de taïga. Tiré de Ranson *et al.* (2004).

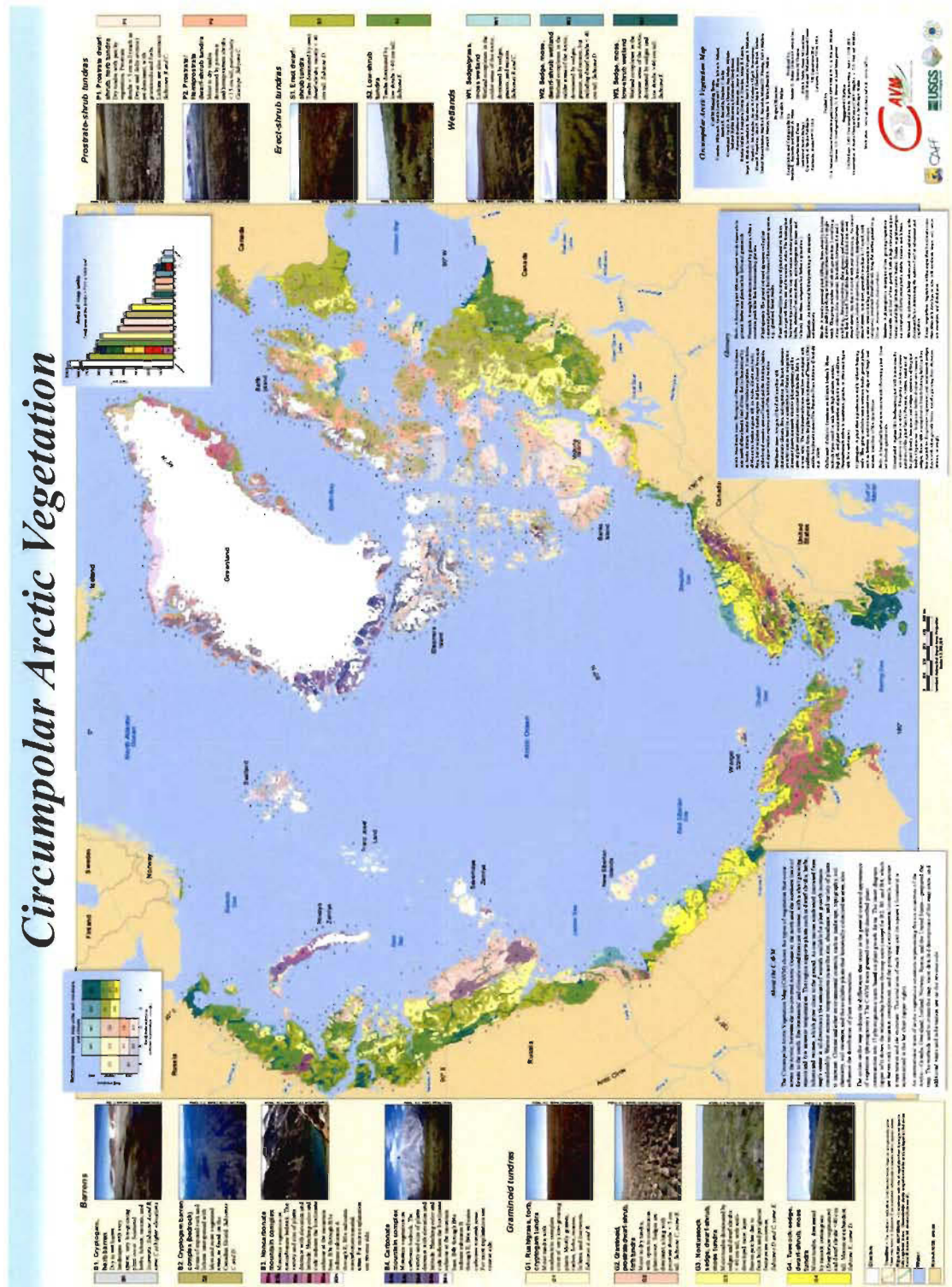
MODIS classé comme	Classes Landsat				
	Toundra	0–0.25	0.25–0.5	0.5–0.75	Taïga
Toundra	96.5	82.1	21.4	1.1	0.0
0–0.25	3.47	17.2	35.1	5.1	0.5
0.25–0.5	0.0	0.7	35.7	26.1	2.1
0.5–0.75	0.0	0.0	7.7	54.8	37.0
Taïga	0.0	0.0	0.1	12.9	60.4
Non classé	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Outre Landsat et MODIS, le capteur AVHRR a également été utilisé en Arctique. C'est en 1992 que débute le plus grand projet de cartographie végétale en Arctique, le Circumpolar Arctic Vegetation Map (CAVM). Avant ce projet, seulement des cartographies végétales produites sur de petits territoires à partir de photographies aériennes existaient et n'incluaient pas une compréhension moderne des patrons de la végétation (Gould *et al.*, 2002). Peu de cartes avaient été produites sur de grands territoires. Les objectifs du CAVM étaient de produire des cartes et des descriptions sur la végétation régionale à l'échelle de 1 : 4 000 000, des cartes sur la physionomie de la végétation dominante et une cartographie sur la végétation à l'échelle de 1 : 7 500 000 (Figure 2.3) qui couvre l'ensemble de l'Arctique et montre les communautés de plantes dominantes en utilisant une image AVHRR à 1 kilomètre de résolution (Gould *et al.*, 2002), dont une seule image du capteur AVHRR permet de couvrir l'Arctique canadien en entier. Pendant plus d'une décennie, plusieurs chercheurs et experts ont évalué et vérifiés des informations en provenance de diverses sources traitant des sous-zones



bioclimatiques, des provinces floristiques, de la topographie et du relief du terrain, de la couverture des surfaces d'eau, du pH du substrat et du NDVI de l'image AVHRR.

Malgré que la cartographie du CAVM permet d'avoir une image réaliste des types de végétation susceptibles d'être retrouvés dans les différents endroits en Arctique en raison de la combinaison de diverses sources d'information. Cette cartographie permet également d'effectuer un suivi de la végétation arctique en lien avec les changements climatiques. L'amélioration de la précision de la carte apporterait une meilleure compréhension des patrons de la végétation. Depuis le début du projet, d'autres capteurs offrant de meilleures résolutions spatiales sont maintenant disponibles. Parmi ceux-ci, le capteur MODIS, lancé en 1999 sur la plateforme Terra, permet d'avoir une résolution spatiale de 250 mètres.



**FIGURE 2.3 :** Cartographie de la végétation de l'ensemble de l'Arctique au 1 : 7 500 000 effectué par l'équipe du CAVM (Circumpolar Arctic Vegetation Map) en utilisant une image AVHRR (CAVM, 2003). Aussi disponible en ligne : [www.geobotany.uaf.edu/cavm/](http://www.geobotany.uaf.edu/cavm/)

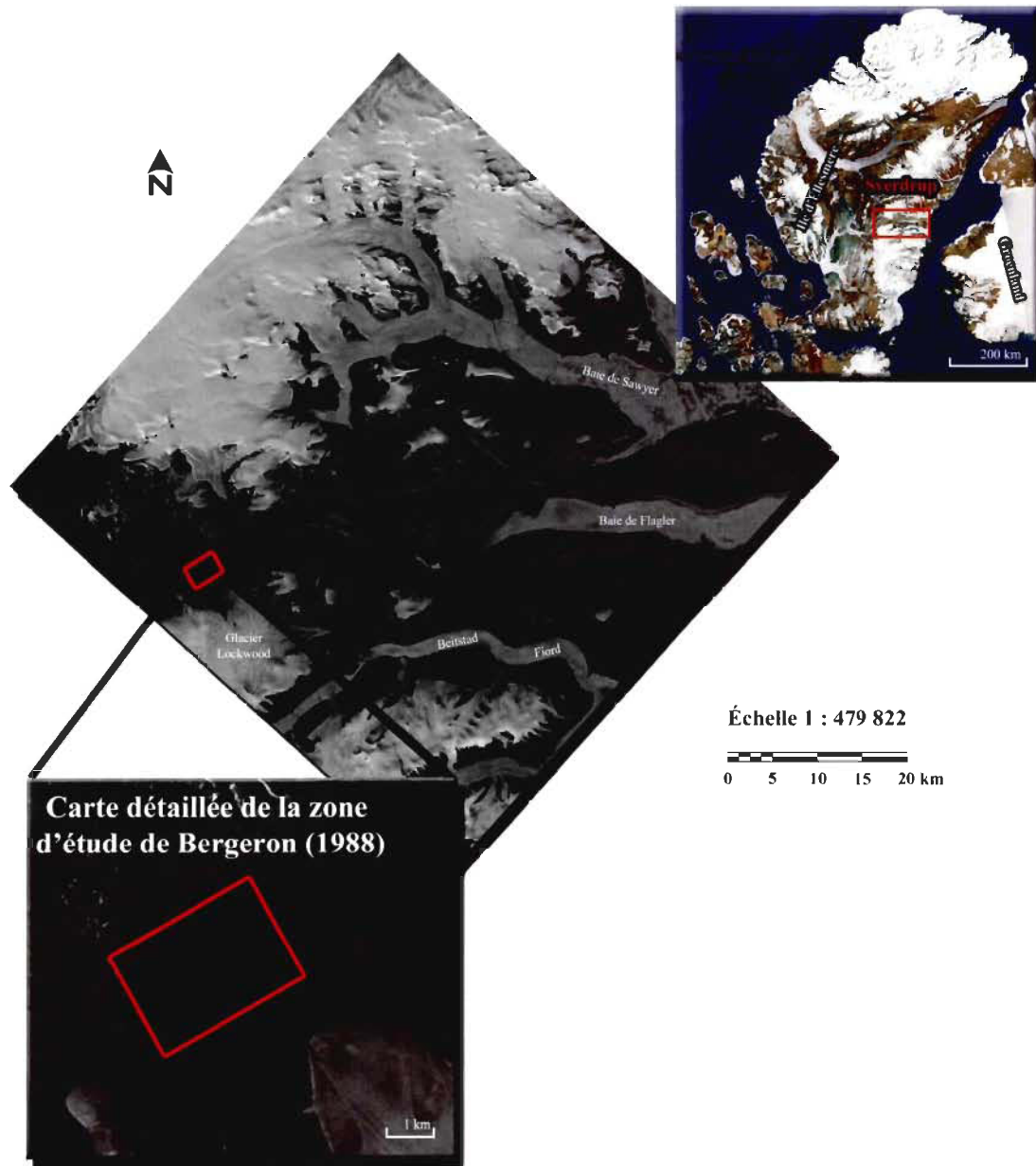
## CHAPITRE 3

### MÉTHODOLOGIE

L'annexe 1 présente un schéma des principales étapes successives de la méthodologie qui permet de visualiser chacune des étapes par rapport à l'ensemble.

#### 3.1 Localisation et géomorphologie de la zone d'étude

La zone d'étude, considérée comme une oasis polaire, est la vallée du col de Sverdrup, située à 79° Nord et entre 78° et 81° Ouest, soit dans la partie centrale de l'île d'Ellesmere (Figure 3.1). Longue de plus de 75 km, elle connecte deux estuaires, la baie de Flagler à l'Est et la baie de Irene à l'Ouest. La géomorphologie et la géologie de surface de la vallée se compose principalement de dépôts fluvioglaciaires, de quelques dunes de sable ainsi que du lit d'une rivière fortement anastomosé constitué de sable et de gravier (Bergeron, 1988). La roche est composée de granite et de gneiss du Précambrien ainsi que de calcaire et de dolomite du Cambrien et de l'Ordovicien inférieur (Bergeron, 1988).



**FIGURE 3.1 :** Image ASTER montrant le col de la vallée de Sverdrup (Earth Observing System Data Gateway - NASA, 2005). Vignette du haut : Localisation du col de la vallée sur l'île d'Ellesmere (Atlas du Canada – Ministère des Ressources Naturelles du Canada, 2006).

## 3.2 Types d'image satellite utilisés et traitement des images

### **3.2.1 Présentation des images satellites**

Deux types d'image satellite (ASTER et MODIS) de la région de Sverdrup sont utilisés dans le cadre de ce projet et ont été prises simultanément le 4 juillet 2003 à 18 h 35 GMT, sans couverture nuageuse importante. L'image ASTER possède une résolution spatiale de 15 mètres pour les bandes spectrales du rouge, 630 à 690 nm, et du proche infrarouge, 780 à 860 nm, tandis que l'image MODIS possède une résolution spatiale de 250 mètres pour les bandes spectrales du rouge, 620 à 670 nm, et du proche infrarouge, 841 à 876 nm. De plus, les deux images ont été géoréférencées selon la projection « Universal Transverse Mercator » de la zone 17 en utilisant le WGS1984 comme système de référence géodésique.

### **3.2.2 Calculs des réflectances exo-atmosphériques pour ASTER et MODIS et les corrections atmosphériques**

Les valeurs de niveaux de gris (DN) du rouge et du proche infrarouge acquises par les capteurs ASTER et MODIS ont été converties en valeurs de réflectances exo-atmosphériques, définies comme étant le rapport entre l'énergie solaire réfléchie et l'énergie solaire incidente d'une surface.

La formule générale pour calculer la réflectance exo-atmosphérique par pixel pour chacune des bandes, rouge et proche infrarouge, est la suivante :

$$\rho_k = (\pi (u_t)^2 L_{ap,k}) / (\cos \Theta_s E_{ap,k}) \quad (3.1)$$

où  $\rho_k$  est la valeur de réflectance exo-atmosphérique du pixel,  $u_t$  est le facteur de correction pour la distance Terre-Soleil pour la journée d'acquisition de l'image (valeur unique pour tous les pixels),  $L_{ap,k}$  est la luminance apparente au capteur du pixel,  $\Theta_s$  est l'angle zénithal solaire du pixel et  $E_{ap,k}$  est l'éclairement solaire du pixel au niveau du satellite (voir en annexe 2 pour le détail des calculs de réflectances exo-atmosphériques). À partir des valeurs de réflectances exo-atmosphériques, nous avons calculé pour ASTER et MODIS les deux indices de végétation, soit le NDVI (selon l'équation 1) et le SDVI (selon l'équation 2). Afin de connaître les paramètres utilisés pour le calcul du SDVI, veuillez vous référer à l'annexe 3.

L'atmosphère crée des perturbations dues à la présence de deux éléments : les particules liquides ou solides (aérosols, poussières, gouttelettes, etc.) et les molécules de gaz (Bonn et Rochon, 1992). Ainsi, en provoquant des phénomènes d'interaction (absorption, diffusion, réfraction), l'atmosphère agit tel un filtre, très variable au niveau de l'image, qui affecte les mesures de télédétection (Bonn et Rochon, 1992) se manifestant alors en atténuant les signaux de l'atmosphère comme les valeurs de réflectance exo-atmosphérique (Robin, 2002).

Lorsqu'une comparaison veut être faite entre des images acquises à différentes dates, il est nécessaire d'effectuer une correction atmosphérique sur ces images, car celles-ci partagent des conditions atmosphériques différentes. Toutefois, nos capteurs ASTER et MODIS ont la particularité d'être sur la même plateforme, Terra, et partagent ainsi des conditions atmosphériques identiques, car elles ont été acquises exactement en même temps, à la même date et à la même heure. En effet, le niveau d'éclairement est le

même, c'est-à-dire que l'angle solaire est identique pour les deux capteurs faisant en sorte que nous retrouvons les zones ombragées aux mêmes endroits. De plus, la distance terre-soleil est également la même pour les deux capteurs, c'est-à-dire que le rayonnement électromagnétique doit franchir les mêmes strates pour des surfaces identiques. Pour ces raisons, aucune correction atmosphérique n'a été appliquée à nos images puisque les atténuations au niveau des signaux de la réflectance exo-atmosphérique seront identiques pour les deux images.

### 3.3 Données de référence acquises sur le terrain

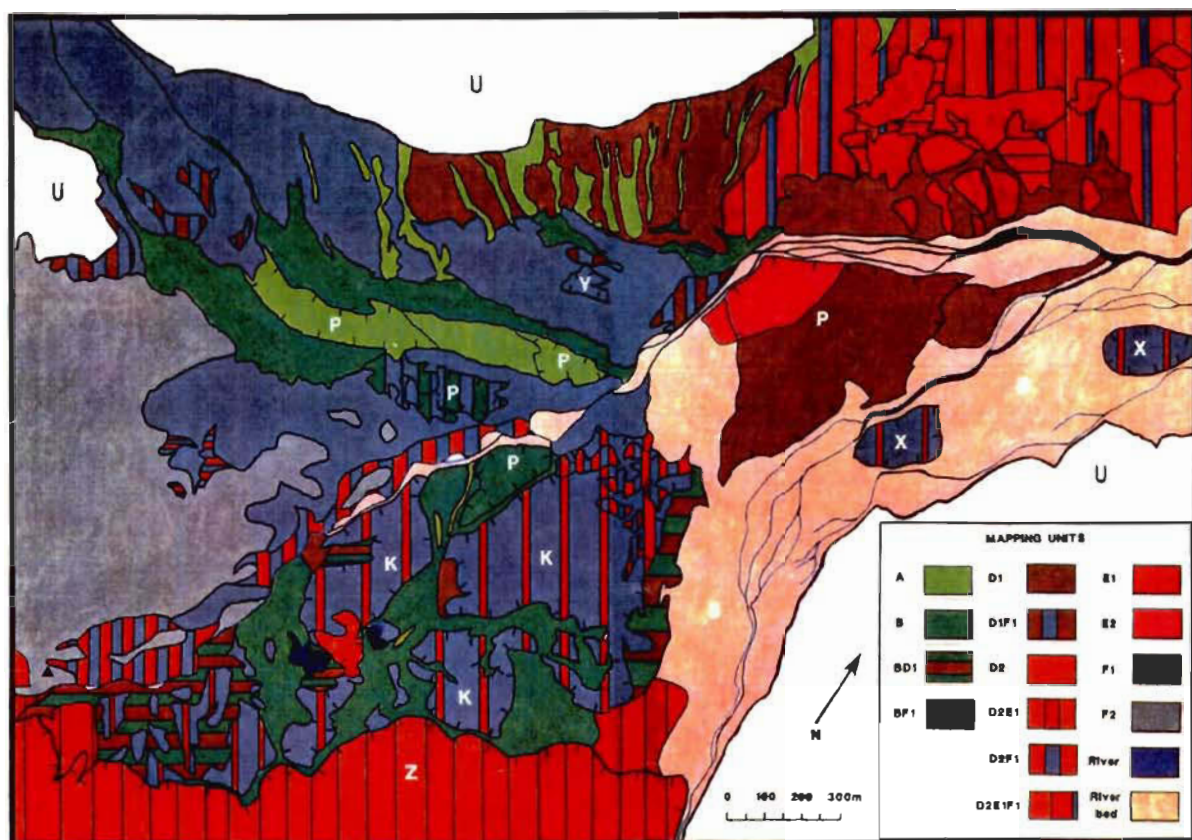
#### **3.3.1 Présentation des données de référence acquises sur le terrain**

Les données de référence sur la végétation de la vallée du col de Sverdrup utilisées dans notre étude proviennent de Bergeron (1988) et ont été récoltées au cours de l'été 1986 à travers 65 sites d'échantillonnage. Durant son échantillonnage, il a identifié soixante-quinze espèces vasculaires différentes. Pour chaque site, la composition floristique, les espèces indicatrices et l'habitat de chaque type de communauté végétale ont été décrits (Bergeron, 1988). En plus d'avoir effectué une description de la végétation sur l'ensemble de la vallée, il a produit une cartographie détaillée sur une petite portion du territoire de la vallée au nord-ouest du glacier Lockwood qui couvre 2.2 X 3.2 km située à 79°50' Ouest (Figure 3.2). Sa classification est composée de 14 classes dont l'identification de huit d'entre elles, que nous appellerons des classes de base, s'est faite selon les première et deuxième espèces dominantes de la classe (Figure 3.2). Les six classes restantes forment une mosaïque à partir de la combinaison de deux ou trois classes de base et elles représentent donc des classes mixtes.

La carte détaillée de Bergeron (1988) était disponible en format papier seulement et a donc dû être numérisée. Nous avons géoréférencé la carte détaillée de Bergeron (1988) à partir d'une orthophoto (2,54 mètres de résolution spatiale) générée d'une photographie aérienne en noir et blanc prise le 18 août 1959 (A16786-70). L'orthophoto permet de corriger d'une part l'effet d'optique de la photographie aérienne, soit une déformation radiale des objets associés à l'effet de la lentille provoquant une inclinaison de ceux-ci du centre vers les bords de la photographie. D'autre part, l'effet de la topographie, créant aussi l'inclinaison des objets selon la pente et l'orientation du relief, est également corrigé par l'utilisation d'un modèle numérique d'élévation (MNE) produit par le couple stéréo de la bande du proche infrarouge de ASTER. Les points de contrôle de l'orthophoto ont été choisis selon le critère qu'ils représentaient des éléments qui évoluent lentement (des buttes de roche par exemple) et les coordonnées géographiques de ces points de contrôle proviennent de l'identification de ces mêmes éléments sur l'image ASTER, déjà géoréférencée. Enfin, la carte détaillée de Bergeron (1988) est géoréférencée par l'association d'éléments pouvant être identifiés adéquatement sur la carte détaillée et sur l'orthophoto.

Il faut noter une limitation concernant l'utilisation de la cartographie effectuée par Bergeron (1988) par rapport aux images satellites, acquises en 2003. Quinze ans séparent les deux sources de données, faisant en sorte que des différences relatives à la répartition du couvert de la végétation entre la carte de Bergeron (1988) et les images satellites sont survenues. Malgré la présence de ces différences, les variations du couvert de la végétation à ces latitudes sont faibles puisque la végétation arctique évolue très lentement en raison des conditions extrêmes qui s'y trouvent et de la courte saison de croissance (Hinzman *et al.*, 2005).



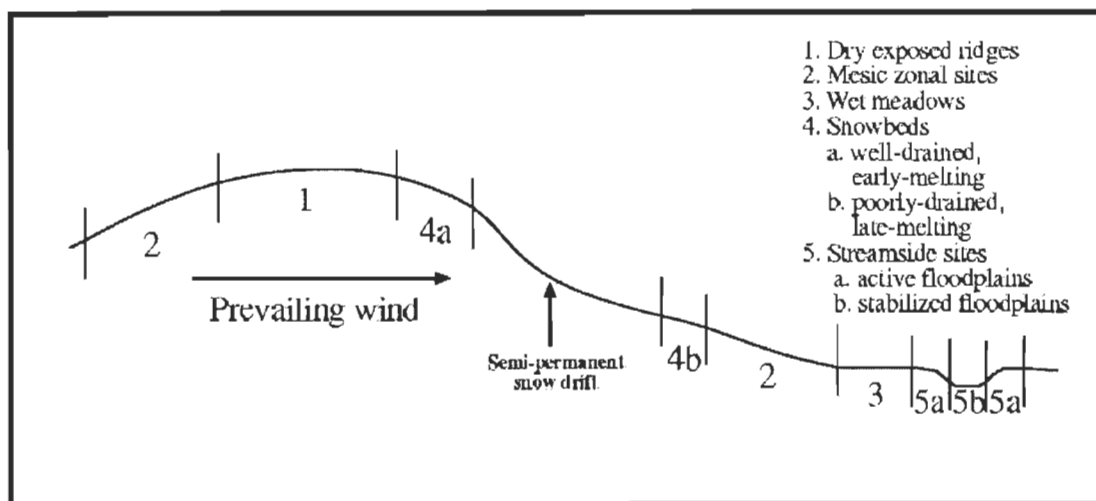


	NODUM	FIRST DOMINANT	SECOND DOMINANT		GEOMORPHIC FEATURES
A <i>Carex aquatilis</i> -Bryophyte - <i>Eriophorum triste</i>		D2 <i>Dryas integrifolia</i> - <i>Salix arctica</i>	E1 Bryophyte- <i>Dryas integrifolia</i> - <i>Salix arctica</i>	K knoll	
B <i>Carex aquatilis</i> -Bryophyte		Mosaic of D2 & E1	E2 <i>Saxifraga oppositifolia</i> - <i>Dryas integrifolia</i>	P polygon S sandur	
Mosaic of B & D1		Mosaic of D2 & F1 D2:20%-F1:80%	F1 <i>Salix arctica</i> - <i>Dryas integrifolia</i>	X fluvio-glacial material core	
Mosaic of B & F1		Mosaic D2-E1-F1	F2 <i>Salix arctica</i>	Y sand dunes	
		D2:40%-E2:40%-F1:20%		Z igneous foothills	
D1 <i>Dryas integrifolia</i> - <i>Cassiope tetragona</i>					
Mosaic of D1 & F1					
					U unsurveyed foothills and slopes
					▲ Camp

**FIGURE 3.2 :** Carte détaillée de la végétation du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere, selon l'étude de terrain de Bergeron (1988).

### 3.3.2 Gradient d'humidité du sol et les classes des trois types de végétation

Les régions nordiques présentent majoritairement une végétation clairsemée où les écosystèmes arides et semi-arides prédominent au nord du 52<sup>e</sup> parallèle (Cantin, 1996). Les écosystèmes arctiques sont caractérisés par de faibles valeurs de températures d'air et de sol, un pergélisol, une courte saison de croissance des plantes ainsi qu'une productivité végétale limitée (Stow *et al.*, 2004). Plusieurs études nordiques ont montré que les variations de la végétation dans l'Arctique canadien étaient influencées par le climat, le substrat rocheux et la topographie, dont ce dernier contrôle principalement la variation du régime d'humidité parmi les différentes unités du terrain et qu'à son tour, l'humidité du sol contrôle l'assemblage des communautés de plantes et les processus des écosystèmes (Batten et Svoboda, 1994; Gould *et al.*, 2002; Jia *et al.*, 2002; Walker *et al.*, 2002). Le couvert de neige est également l'un des éléments principaux influençant la distribution de la végétation. La neige permet d'isoler la végétation du froid pendant l'hiver, réduit la saison de croissance et est une source importante d'humidité (Bergeron, 1988; Muc *et al.*, 1994). La distribution de la neige est d'ailleurs influencée par la topographie en créant des zones humides dans les dépressions lors de la période de fonte (Batten et Svoboda, 1994). La figure 3.3 présente les effets de la topographie et de l'humidité du sol d'une manière conceptuelle selon laquelle les sommets des buttes présentent des conditions plus sèches, tandis que plus on se dirige vers le bas de la butte jusqu'à atteindre le creux, l'humidité du sol tendra vers des conditions plus humides.



**FIGURE 3.3 :** Gradient conceptuel de l'humidité du sol selon les effets topographiques (Walker *et al.*, 2002).

La classification de la carte détaillée de Bergeron (1988) de la figure 3.2 suit le modèle théorique du gradient d'humidité du sol de la figure 3.3. En effet, les espèces dominantes des classes de Bergeron (1988) peuvent être associées à différents niveaux d'humidité du sol. L'humidité du sol a été déterminée en utilisant un contenant de métal (235 cm<sup>3</sup>, diamètre : 8,5 cm). Les échantillons ont été récoltés durant la mi-saison de croissance suite à au moins trois jours consécutifs sans pluie. La formule suivante a été utilisée pour calculer l'humidité du sol :

$$\% \text{ VSM} = D_m / D_e * [(P_e / P_s) * 100] \quad (3.2)$$

où % VSM est le contenu volumétrique d'humidité du sol en pourcentage,  $D_m$  la densité de la masse sèche de l'échantillon de sol,  $D_e$  la densité de l'eau (i.e. 1,0),  $P_e$  le poids de l'eau perdu lors du séchage de l'échantillon à 100°C et  $P_s$  le poids de l'échantillon après séchage.

Les classes A et B (espèce dominante : *Carex aquatilis*) ont des proportions moyennes d'humidité du sol les plus élevées avec, respectivement, 54,1% ± 1.8% et

70,8%  $\pm$  29,4% (Bergeron, 1988). Le recouvrement végétal en pourcentage moyen est de 66,9%  $\pm$  23,2% pour la classe A et de 79,0%  $\pm$  21,0% pour la classe B (Bergeron, 1988). Ce qui distingue la classe A de la B est la présence d'espèces indicatrices, soit l'*Eriophorum triste* pour la classe A ainsi que le *Pedicularis hirsuta* et le *Saxifraga hirculus* pour la classe B. Les classes D et E (espèce dominante : *Dryas integrifolia*) ont des proportions moyennes d'humidité du sol plus faibles que les classes A et B avec, respectivement, 28,7%  $\pm$  18,8% et 31,1%  $\pm$  16,1% (Bergeron, 1988). Le recouvrement végétal en pourcentage moyen est de 34,3%  $\pm$  23,4% pour la classe D et de 30,3%  $\pm$  16,2% pour la classe E (Bergeron, 1988). Les espèces indicatrices qui distinguent la classe D de la E sont le *Carex rupestris* et le *Carex misandra* pour la classe D ainsi que le *Poa abbreviata* et le *Saxifraga tricuspidata* pour la classe E. La classe F (espèce dominante : *Salix arctica*) a les plus faibles proportions avec 24,3%  $\pm$  18,0% (Bergeron, 1988). Le recouvrement végétal en pourcentage moyen est de 21,4%  $\pm$  18,7% pour la classe F (Bergeron, 1988).

Aucunes classes de Bergeron (1988) mentionnées plus haut ne sont homogènes à 100% car elles correspondent à des assemblages de plantes. Le tableau 3.1 montre à quel point certaines classes de Bergeron (1988) sont similaires en terme de NDVI ASTER. Pour cette raison, le regroupement des classes de Bergeron (1988) en d'autres classes est nécessaire. La confusion entre ces classes auraient été trop importantes en l'absence de regroupement selon le degré d'humidité du sol, par exemple les classes D1 et E1. Nous avons éliminé toutes les classes végétales mixtes (classes correspondant aux mosaïques de la cartographie végétale de Bergeron) pour ne pas inclure d'informations dont le contenu est mixte.

L'association entre les espèces dominantes et le gradient d'humidité du sol a permis de regrouper certaines classes de Bergeron (1988) sous trois grandes classes (Tableau 3.2). Chaque classe réfère à un niveau d'humidité du sol ainsi qu'à l'espèce dominante associée à ce niveau. Les trois groupes sont les suivants : sèche – *Salix*

*arctica*, mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex aquatilis*. Dans cette étude, lorsque nous parlons de « types de végétation », cela fait référence aux trois classes de végétation désignées par sèche – *Salix arctica*, mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex aquatilis*.

**TABLEAU 3.1**

Similitudes spectrales en terme de NDVI ASTER des classes végétales de Bergeron (1988). Le NDVI ASTER correspond à la moyenne des valeurs des pixels calculée sur la surface couverte par chacune des classes végétales.

Classes végétale de Bergeron (1988)	NDVI ASTER	Écart-type NDVI ASTER
A	0,194	0,075
B	0,214	0,065
D1	0,124	0,044
D2	0,178	0,064
E1	0,121	0,035
E2	0,117	0,045
F1	0,094	0,052
F2	0,084	0,039

**TABLEAU 3.2**

Association entre les classes de Bergeron (1988) et les types de végétation de notre étude. Les lettres réfèrent aux classes de la classification de Bergeron (1988) présentées à la figure 3.2.

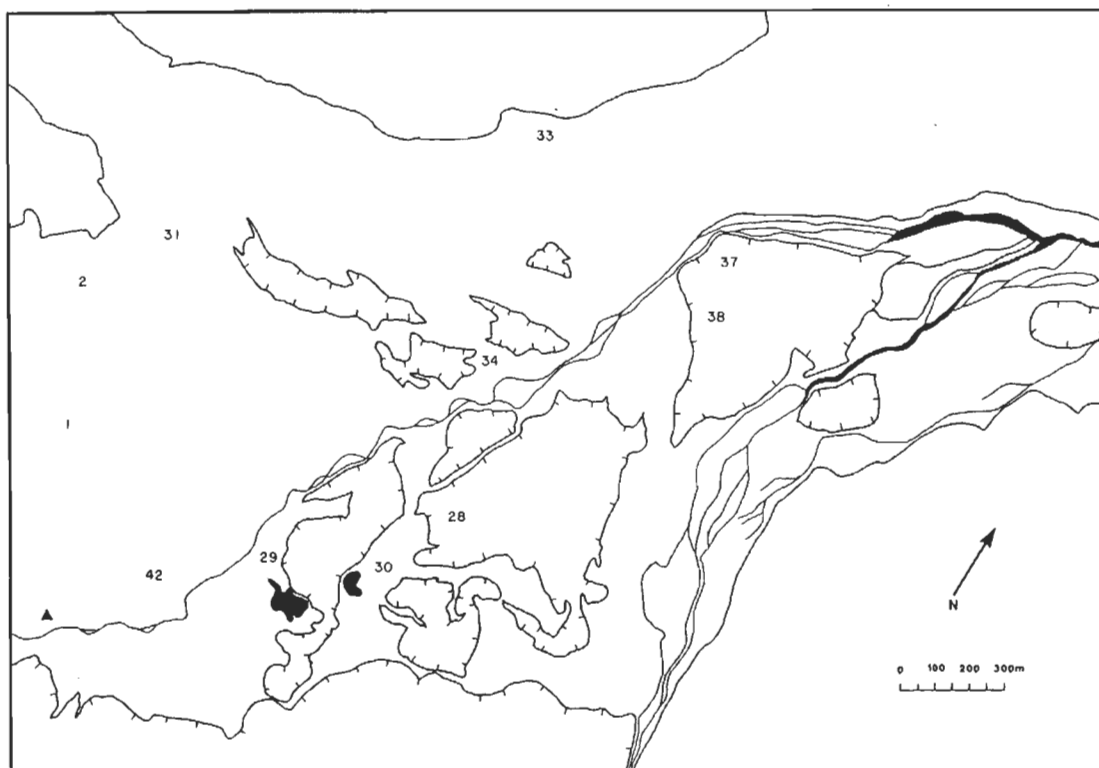
Types de végétation	Classes de Bergeron (1988) associées
Sèche - <i>Salix arctica</i>	F1, F2
Mésique - <i>Dryas integrifolia</i>	D1, D2, E1, E2
Humide - <i>Carex aquatilis</i>	A, B

### 3.4 Calculs de variables et cartographies végétales à l'échelle de ASTER

L'objectif de cette section est de constituer une base de données comprenant différentes variables (recouvrement végétal en pourcentage, proportions des cinq types de couvert, NDVI et SDVI) pour chaque pixel de l'image ASTER à 15 mètres qui vont être utilisées pour l'analyse ultérieure des changements d'échelles. Cette base de données est validée à partir de données tirées de l'étude de Bergeron (1988).

#### **3.4.1 Relation entre les données végétales de référence et le NDVI ASTER (calcul du recouvrement végétal en pourcentage)**

En plus de représenter la répartition de la végétation par sa carte détaillée de la zone d'étude, Bergeron (1988) a également localisé sur le territoire couvert par sa carte quelques sites d'échantillonnage (Figure 3.4), dont le recouvrement végétal en pourcentage fut l'une des variables recueillies. Puisque les valeurs d'un indice de végétation sont une indication de la proportion de végétation contenue dans le pixel, nous avons associé le recouvrement végétal en pourcentage mesuré par Bergeron (1988) avec le NDVI de l'image ASTER.



**FIGURE 3.4 :** Localisation des sites d'échantillonnage de Bergeron (1988). Les chiffres représentent les sites d'échantillonnage utilisés par notre étude.

La carte des sites d'échantillonnage a été superposée à l'image du NDVI ASTER. Au total, dix sites d'échantillonnage de l'étude de Bergeron (1988), dont quatre de végétation sèche – *Salix arctica*, trois de végétation mésique – *Dryas integrifolia* et trois de végétation humide – *Carex aquatilis*, ont été sélectionnés pour établir la relation entre le recouvrement végétal en pourcentage calculé par Bergeron (1988) et les deux indices de végétation, le NDVI et le SDVI, à l'échelle ASTER. Le positionnement géographique des sites d'échantillonnage de la carte détaillée a été fait à partir de l'interprétation de photographies aériennes par Bergeron (1988), ce qui rend le positionnement légèrement imprécis d'un maximum d'un pixel ASTER de 15 mètres. Toutefois, la méthode de sélection de l'emplacement d'un site d'échantillonnage pour toute étude en écologie végétale préconise la sélection d'un site dont le contenu végétal est représentatif de celui environnant. Cette méthode nous permet alors de sélectionner une série de quelques pixels autour de la position géographique approximative des sites de Bergeron (1988), afin d'associer une moyenne de valeurs de NDVI ASTER avec le

recouvrement végétal en pourcentage. La sélection des pixels du NDVI ASTER a tenu compte de deux critères : 1) les pixels devaient appartenir à la même classe végétale que celle dans laquelle est située le site d'échantillonnage et 2) les pixels devaient être à une distance d'au moins trois pixels de 15 mètres d'une frontière séparant deux classes végétales afin d'éviter le mélange possible entre les classes à cet endroit. Grâce à la relation linéaire entre le recouvrement végétal en pourcentage de Bergeron (1988) et le NDVI ASTER, le calcul d'un recouvrement végétal en pourcentage a été extrapolé à chaque pixel de l'image ASTER du col de la vallée de Sverdrup.

La carte des sites d'échantillonnage de Bergeron (1988) a également été superposée à l'image du SDVI ASTER, en suivant la même procédure qu'avec le NDVI ASTER, dans le but de s'assurer que la relation est linéaire à l'échelle de ASTER entre le SDVI et le recouvrement végétal en pourcentage de Bergeron (1988). Toutefois, la relation basée sur le SDVI n'a pas été utilisée pour calculer un recouvrement végétal en pourcentage pour chaque pixel ASTER car un seul calcul de recouvrement végétal en pourcentage est nécessaire pour cette étude.

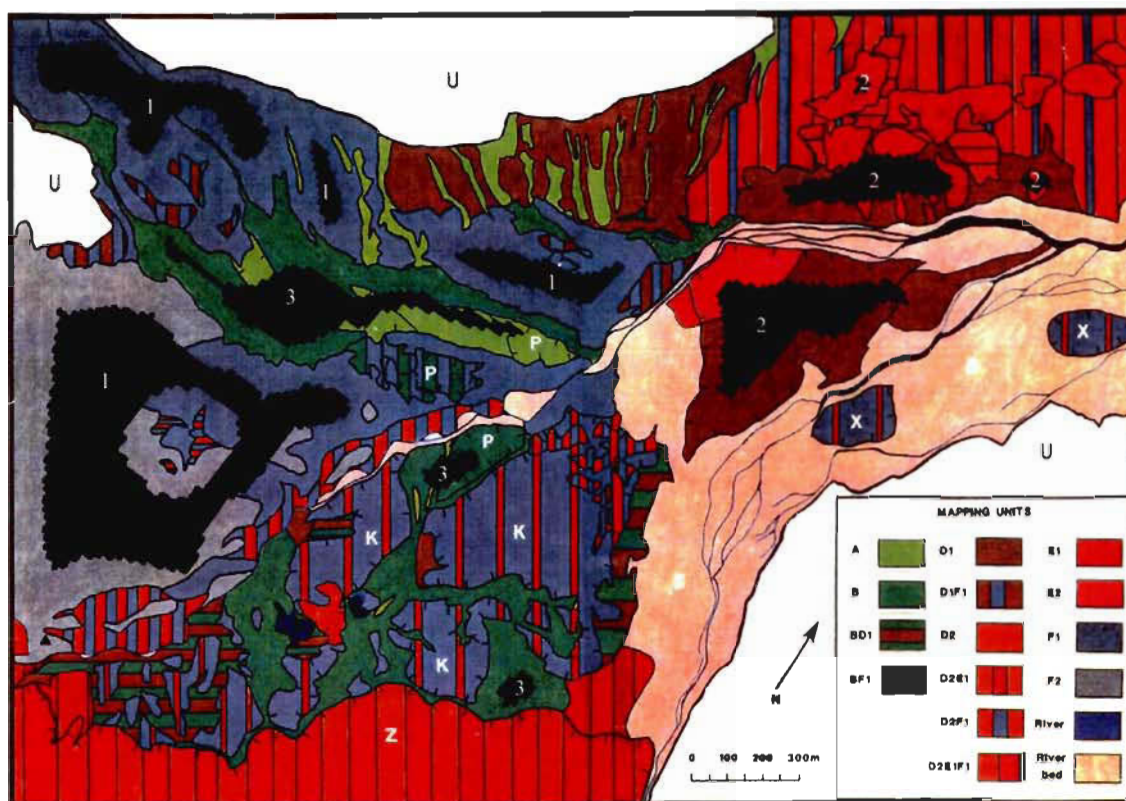
### **3.4.2 Détermination des seuils et cartographies des types de végétation avec le NDVI ASTER et le SDVI ASTER**

Dans son étude, Bergeron (1988) a constaté que plus le recouvrement végétal en pourcentage augmentait, plus la proportion en humidité du sol augmentait également, et ce, de façon linéaire. Face à ces résultats tirés de l'étude de Bergeron (1988) et de la relation linéaire entre le recouvrement végétal en pourcentage recueilli par Bergeron (1988) et le NDVI ASTER établie à la sous-section précédente, trois seuils ont été générés qui permettent de déterminer trois types de végétation. Les seuils sont les suivants : un seuil minimal délimitant la végétation de la roche (seuil roche / sèche – *Salix arctica*), un seuil délimitant les végétations sèche – *Salix arctica* et mésique –



*Dryas integrifolia* (seuil sèche – *Salix arctica* / mésique – *Dryas integrifolia*) et un seuil délimitant les végétations mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex aquatilis* (seuil mésique – *Dryas integrifolia* / humide – *Carex aquatilis*). Chaque type de végétation est alors défini par un état d'humidité du sol, un type de plante dominant, un intervalle de valeurs NDVI ASTER, et un intervalle de recouvrement végétal en pourcentage. Le recouvrement total d'un pixel ASTER correspond à la somme du recouvrement végétal en pourcentage et du recouvrement en pourcentage des couverts de roche, de neige, de glace, de banquise et d'ombre. L'association d'un type de végétation à un intervalle de valeurs NDVI spécifique a été démontrée efficace par d'autres études réalisées en Arctique (Stow *et al.*, 1993; Walker *et al.*, 1995; Rees *et al.*, 1998), dans lesquelles les types de végétation plutôt humides avaient tendance à produire des valeurs de NDVI plus élevées que des types plus secs.

La procédure consistant à générer les trois seuils fut d'utiliser une matrice de correspondance afin de déterminer les seuils permettant de reproduire le plus fidèlement possible les différentes classes de la carte détaillée de Bergeron (1988) du tableau 3.1. Pour cette étape, la carte détaillée de Bergeron (1988) a été superposée à l'image du NDVI ASTER. À partir des classes du tableau 3.1, un masque de quelques polygones a été créé et sert de zone où la correspondance entre les deux sources de données superposées a été faite. La figure 3.5 montre la répartition des différents polygones créés sur le territoire de la carte détaillée de Bergeron (1988). Afin d'éviter les confusions entre les différentes classes de végétation le long des frontières, les pixels d'une distance de moins de trois pixels ASTER des frontières ont été supprimés de l'analyse.



**FIGURE 3.5 :** Masque (les zones gris foncé) utilisé pour la correspondance entre la carte détaillée de la zone d'étude de Bergeron (1988) et le NDVI ASTER. Les zones 1 indiquent des polygones de végétation sèche-*Salix arctica*, les zones 2 des polygones de végétation mésique-*Dryas integrifolia* et les zones 3 des polygones de végétation humide-*Carex aquatilis*.

Une fois les seuils générés, une cartographie représentant les classes des trois types de végétation, de la roche et des autres couverts (neige, glace, banquise et ombre) a été produite sur l'ensemble du col de la vallée de Sverdrup en utilisant le NDVI ASTER. La classe des autres couverts a été générée en effectuant une classification supervisée avec l'algorithme du maximum de vraisemblance en utilisant les bandes du rouge, du proche infrarouge et du NDVI de l'image ASTER. La classe de la roche a été générée lorsque le pixel ne contenait pas de végétation ni d'autres couverts. La cartographie végétale par type de végétation du col de la vallée de Sverdrup permet de localiser les endroits à fortes concentrations de végétation ainsi que de connaître le type de couvert dominant (végétation sèche – *Salix arctica*, végétation mésique – *Dryas*

*integrifolia*, végétation humide – *Carex aquatilis*, roche ou autres couverts) pour chaque pixel de 15 mètres de l'image ASTER.

La même procédure a été utilisée pour la relation linéaire entre le recouvrement végétal en pourcentage de Bergeron (1988) et le SDVI ASTER afin que trois seuils propres au SDVI soient générés et qu'une cartographie soit produite avec cet indice de végétation.

### 3.5 Analyses des changements d'échelles

L'objectif de cette section est d'analyser les effets de changements d'échelles et permet de valider nos outils cartographiques, le NDVI MODIS et le SDVI MODIS. La compréhension de la relation entre les deux résolutions spatiales est essentielle afin de savoir s'il est possible d'estimer le recouvrement végétal en pourcentage et les types de couvert pour chacun des pixels MODIS de 250 mètres. La validation s'est effectuée en comparant les données MODIS à 250 mètres et ASTER 15 mètres.

La procédure consiste à effectuer l'agrégation des pixels ASTER de différentes variables (recouvrement végétal en pourcentage, proportions des cinq types de couverts, NDVI et SDVI) à l'échelle MODIS. Toutefois, les images satellites ASTER (15 mètres) et MODIS (250 mètres) ont des résolutions spatiales qui ne sont pas divisibles entre elles. Une méthode de rééchantillonnage spatial des valeurs spectrales a été utilisée afin que MODIS soit conforme au découpage spatial des pixels ASTER. L'image ASTER a une dimension de 6500 par 6452 pixels de 15 mètre. La méthode de rééchantillonnage fait répéter les valeurs spectrales des pixels MODIS sur les pixels de la dimension couverte par ASTER. Chaque pixel MODIS de 250 mètres est ainsi divisé en différentes surfaces de mesures avec un nombre de pixels ASTER variable d'une surface à l'autre.

Le résultat du rééchantillonnage spatial donne trois surfaces de mesures MODIS, soit des surfaces MODIS de 16 X 16 pixels de 15 mètres (pixels de 240 par 240 mètres), des surfaces MODIS de 16 X 17 pixels de 15 mètres (pixels de 240 par 255 mètres) et des surfaces MODIS de 17 X 17 pixels de 15 mètres (pixels de 255 par 255 mètres). Les différentes variables calculés avec ASTER (NDVI, SDVI, recouvrement végétal en pourcentage) sont donc agrégées en considérant le découpage spatial de ces surfaces de mesures à l'échelle MODIS. Il est alors possible de comparer les mêmes entités géographiques entre ASTER agrégé à l'échelle MODIS (image ASTER-MODIS) et MODIS.

La méthode d'agrégation par la moyenne a été choisie car cette méthode est celle qui produit le moins d'erreurs et qui est statistiquement et spatialement la plus prédictible, contrairement à d'autres méthodes comme la médiane ou la valeur du pixel centrale (Bian et Butler, 1999). La méthode par la moyenne conserve la moyenne des données originales tout au long du processus d'agrégation. Elle assume que la valeur du pixel agrégé est l'intégration de toutes les valeurs des pixels correspondant à la surface au sol. Cette technique est semblable à l'intégration des couverts par pixel des capteurs à résolutions moyennes ou grossières.

Dans un deuxième temps, quatre variables représentant les deux indices de végétation des deux images (NDVI ASTER-MODIS, NDVI MODIS, SDVI ASTER-MODIS, SDVI MODIS) sont comparées à l'aide de régression linéaire au recouvrement végétal en pourcentage agrégé par surface de mesures. Les analyses de régression linéaire au niveau du NDVI ASTER-MODIS et du SDVI ASTER-MODIS permettent de déterminer si les deux indices de végétation conservent une relation linéaire avec le recouvrement végétal en pourcentage après avoir subi une agrégation. Les analyses de régression linéaire au niveau du NDVI MODIS et du SDVI MODIS servent à valider la linéarité des deux indices de végétation et à quantifier les effets des changements d'échelles.

### 3.6 Cartographie végétale avec le NDVI MODIS

La dernière étape est de produire une cartographie de la végétation du col de la vallée de Sverdrup avec l'image MODIS en utilisant l'indice de végétation, NDVI ou SDVI, qui présente la plus forte linéarité avec le recouvrement végétal en pourcentage lors de l'analyse des changements d'échelles. La cartographie végétale MODIS montre les endroits à hautes concentrations végétales ainsi que les probabilités de retrouver par surface de mesures chacun des types de couvert, soient les trois types de végétation (sèche – *Salix arctica*, mésique – *Dryas integrifolia*, humide – *Carex aquatilis*), la roche et les autres couverts.

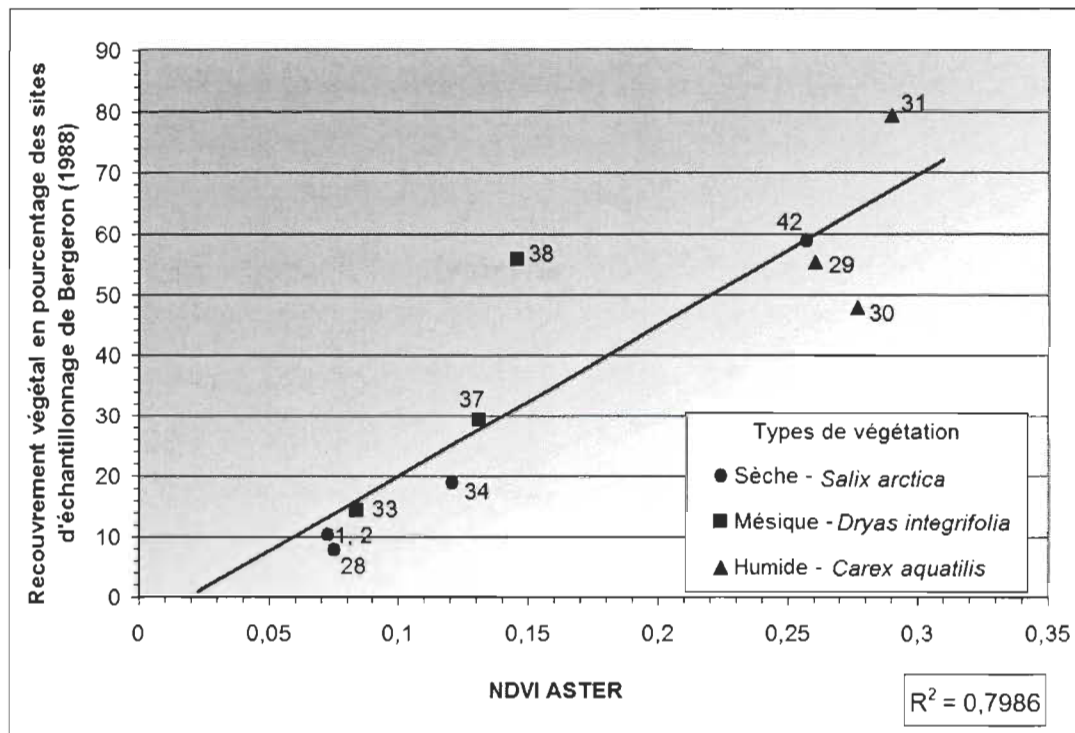
## CHAPITRE 4

### RÉSULTATS

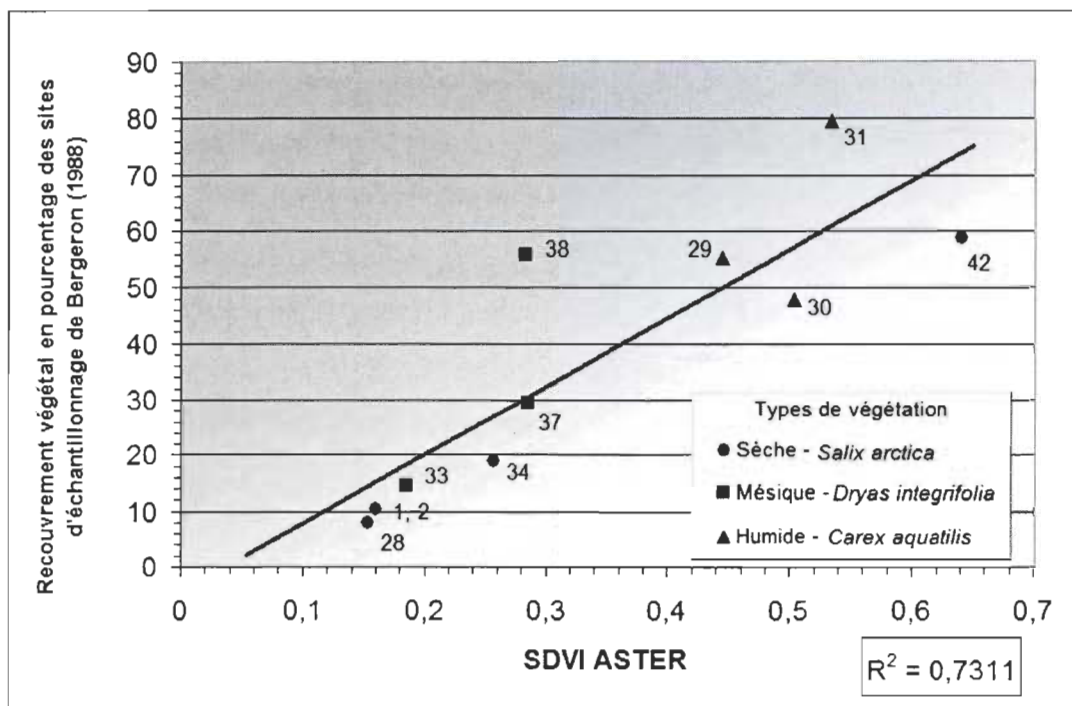
#### 4.1 Calculs des variables et cartographies végétales à l'échelle ASTER

##### **4.1.1 Relation entre les données végétales de référence et le NDVI ASTER**

La relation linéaire du NDVI ASTER (Figure 4.1) est légèrement meilleure que celle du SDVI ASTER (Figure 4.2) avec, respectivement, des  $R^2$  de 0,7986 et 0,7311. Les résultats indiquent que le type de végétation de milieux secs tend à produire des valeurs faibles de NDVI, la végétation de milieux humides tend à produire des valeurs élevées de NDVI et la végétation de milieux mésiques se situe entre les deux. L'équation de la droite de régression de la figure 4.1 permet de calculer un recouvrement végétal en pourcentage pour chaque pixel de l'image ASTER et d'étudier la répartition de la végétation du col de la vallée de Sverdrup afin de connaître les endroits où la végétation se concentre (Figure 4.3).

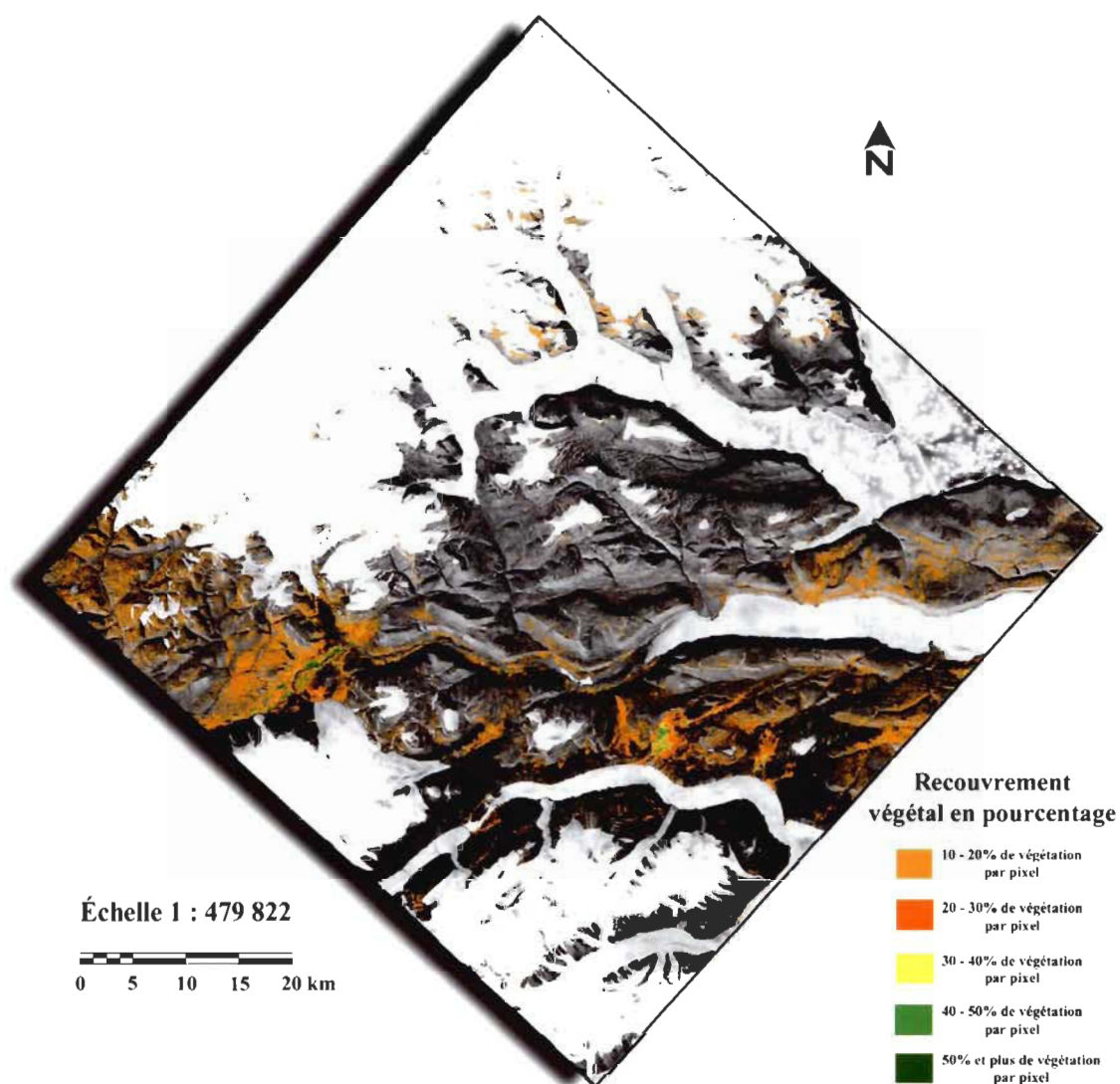


**FIGURE 4.1 :** Relation entre le NDVI ASTER et le recouvrement végétal en pourcentage définie par Bergeron (1988) pour ces sites d'échantillonnage, tels qu'identifiés à la figure 3.4. L'équation de la droite de régression utilisée pour le calcul du recouvrement végétal en pourcentage est  $y = 247.47x - 4,5829$ .



**FIGURE 4.2 :** Relation entre le SDVI ASTER et le recouvrement végétal en pourcentage définie par Bergeron (1988) pour ces sites d'échantillonnage, tels qu'identifiés à la figure 3.4.





**FIGURE 4.3 :** Répartition du recouvrement végétal en pourcentage de l'image ASTER le long du col de la vallée de Sverdrup.

#### 4.1.2 Détermination des seuils des types de végétation avec le NDVI ASTER et le SDVI ASTER

Suite au calcul du recouvrement végétal en pourcentage, deux seuillages, l'un avec le NDVI ASTER (Tableau 4.1a) et l'autre avec le SDVI ASTER (Tableau 4.1b), ont été effectués afin de déterminer les seuils propres à chacun des indices de végétation entre la roche et les types de végétation, soient les seuils roche / sèche – *Salix arctica*, sèche – *Salix arctica* / mésique – *Dryas integrifolia* et mésique – *Dryas integrifolia* / humide – *Carex aquatilis*. Les analyses par les matrices de correspondance montrent, qu'à l'échelle de ASTER, la discrimination entre les trois types de végétation est possible avec une bonne précision moyenne, soit 80,53% pour le NDVI ASTER et 72,88% pour le SDVI ASTER. Malgré la plus faible précision du SDVI, les intervalles du recouvrement végétal en pourcentage sont presque identiques pour les deux indices de végétation (Tableau 4.1).

**TABLEAU 4.1**

Matrices de correspondance entre les classes de Bergeron (1988) déterminées par un échantillonnage sur le terrain et les classifications végétales produites à partir des indices de végétation, le NDVI ASTER en (A) et le SDVI ASTER en (B).

**A**

Classes Bergeron (1988)		Classification NDVI ASTER			
Types de végétation	Pixels par classe	Non classé	Sèche	Mésique	Humide
Sèche	1895	2,0	76,3	21,3	0,4
Mésique	567	0,2	1,6	77,1	21,2
Humide	399	0,0	0,0	11,8	88,2

Précision moyenne = 80,53%  
Précision globale = 78,12%

Détails des seuils :

Nom du seuil	Intervalle de NDVI ASTER	Intervalle du recouvrement végétal en pourcentage
Roche / Sèche - <i>Salix arctica</i>	0,06 - 0,1	10 - 20
Sèche - <i>Salix arctica</i> / Mésique - <i>Dryas integrifolia</i>	0,1 - 0,21	20 - 50
Mésique - <i>Dryas integrifolia</i> / Humide - <i>Carex aquatilis</i>	0,21 et plus	50 et plus

**B**

Classes Bergeron (1988)		Classification SDVI ASTER			
Types de végétation	Pixels par classe	Non classé	Sèche	Mésique	Humide
Sèche	1895	3,6	65,6	29,8	0,9
Mésique	567	0,9	24,5	72,8	1,8
Humide	399	0,0	0,3	19,5	80,2

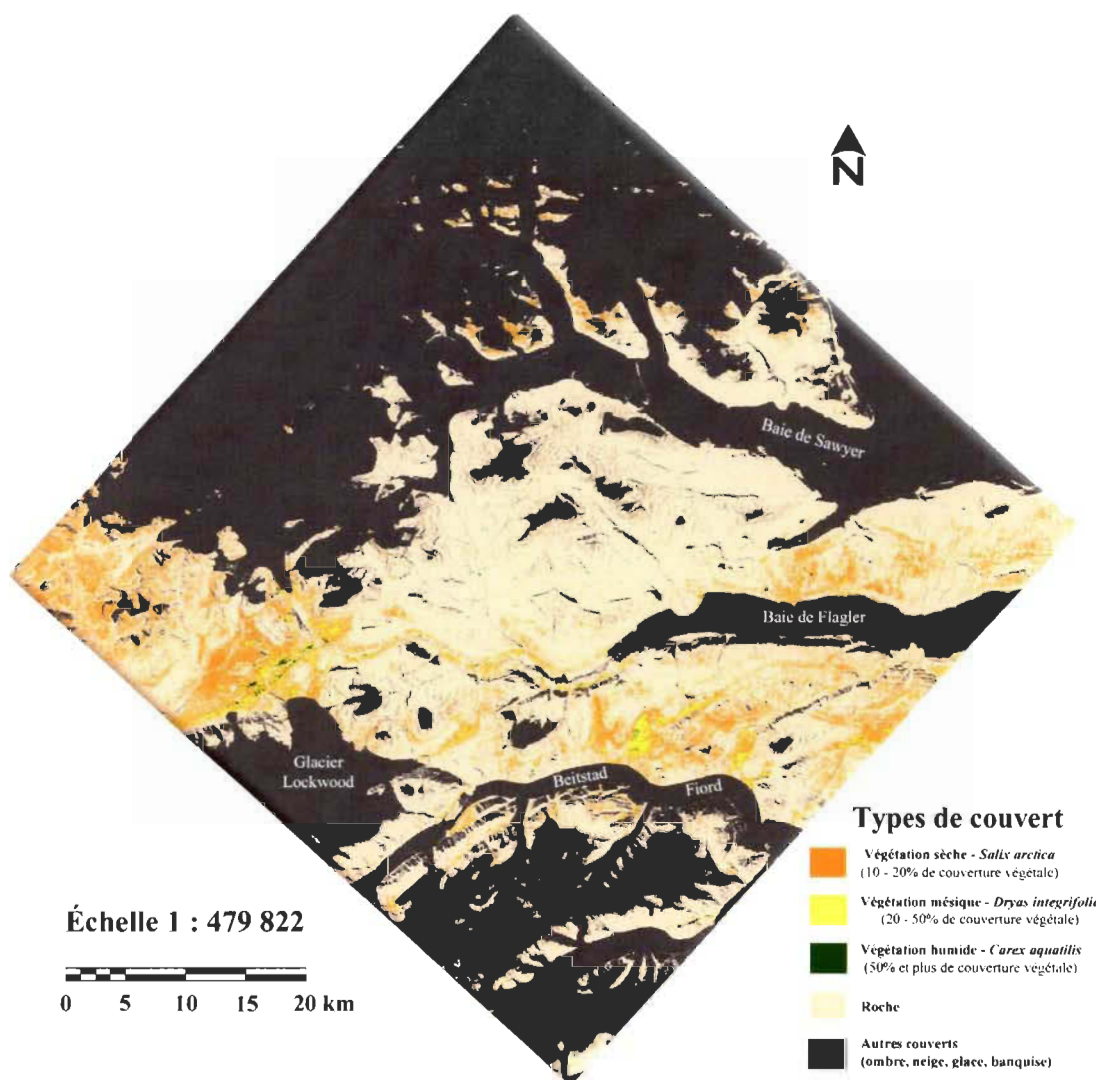
Précision moyenne = 72,88%  
Précision globale = 69,07%

Détails des seuils :

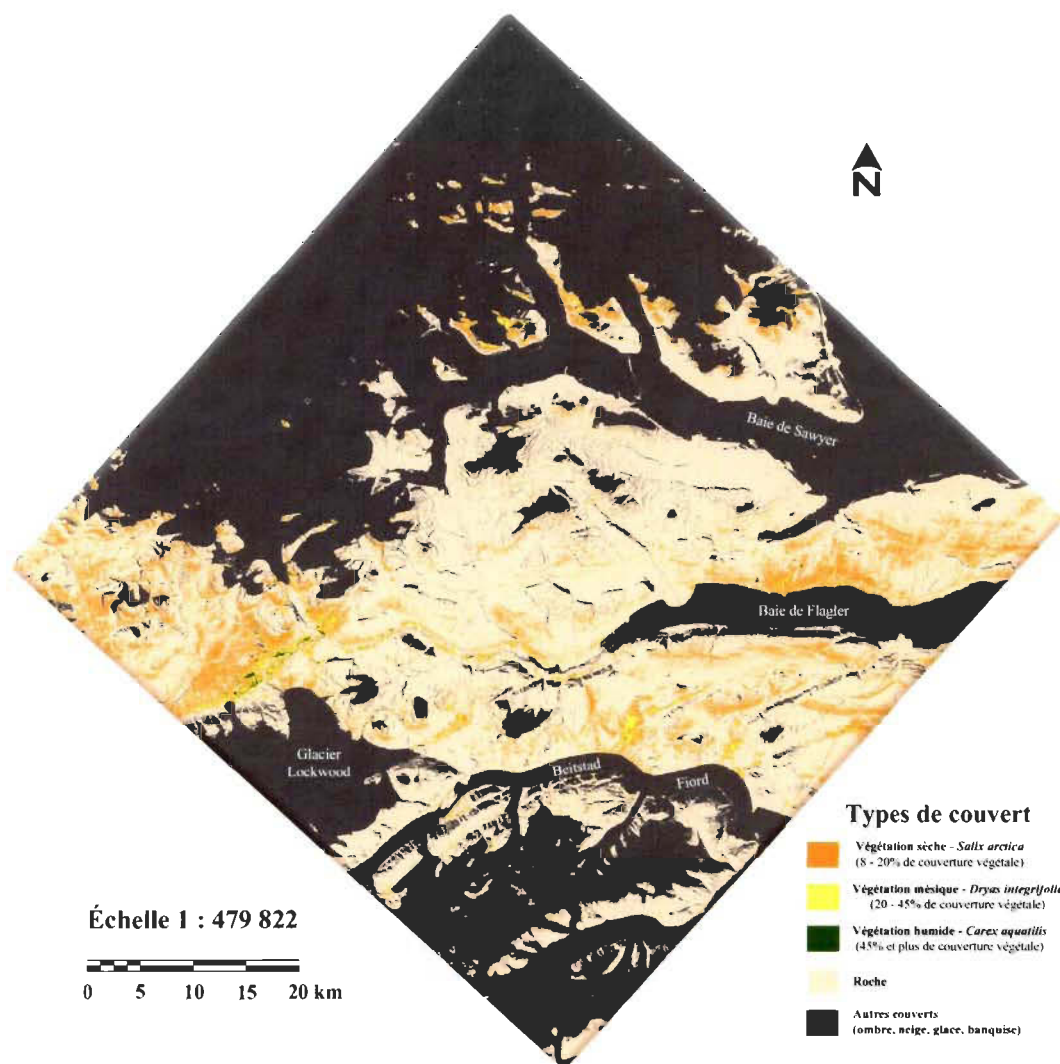
Nom du seuil	Intervalle de SDVI ASTER	Intervalle du recouvrement végétal en pourcentage
Roche / Sèche - <i>Salix arctica</i>	0,12 - 0,21	8 - 20
Sèche - <i>Salix arctica</i> / Mésique - <i>Dryas integrifolia</i>	0,21 - 0,4	20 - 45
Mésique - <i>Dryas integrifolia</i> / Humide - <i>Carex aquatilis</i>	0,4 et plus	45 et plus

### 4.1.3 Cartographies végétales du NDVI ASTER et du SDVI ASTER

À partir des seuils, nous avons produit les cartographies végétales du NDVI ASTER (Figure 4.4) et du SDVI ASTER (Figure 4.5). Les deux indices de végétation suivent des tendances similaires dans l'estimation de la proportion du couvert de végétation. Certaines différences sont observables dans la répartition de la végétation. En effet, la partie extrême ouest du col de la vallée montre plus de végétation sèche – *Salix arctica* sur la carte du NDVI ASTER que sur celle du SDVI ASTER. Inversement, juste au nord de la baie de Flagler, le SDVI ASTER a estimé plus de végétation sèche – *Salix arctica* que le NDVI ASTER. Au sud de la baie de Flagler, c'est le NDVI ASTER qui estime une plus grande proportion de végétation sèche – *Salix arctica* et mésique – *Dryas integrifolia* que le SDVI ASTER.



**FIGURE 4.4 :** Cartographie végétale produite avec le NDVI ASTER du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere.



**FIGURE 4.5 :** Cartographie végétale produite avec le SDVI ASTER du col de la vallée de Sverdrup, île d’Ellesmere.

Le tableau 4.2 montre une matrice de correspondance faite entre le NDVI ASTER et le SDVI ASTER, dont la précision moyenne s’élève à plus de 77,5% de ressemblance entre les deux cartographies. La ressemblance la plus faible est au niveau du couvert présentant les plus faibles recouvrements végétaux en pourcentage, la végétation sèche – *Salix arctica*, avec une précision de 57,1%. La précision augmente avec le recouvrement végétal en pourcentage, soit une précision de 60,1% pour la

végétation mésique – *Dryas integrifolia* et de 74,6% pour la végétation humide – humide – *Carex aquatilis*.

**TABLEAU 4.2**

Comparaison des cartographies du NDVI ASTER et du SDVI ASTER par une matrice de correspondance.

Cartographie SDVI ASTER	Cartographie NDVI ASTER				
Types de couvert	Sèche	Mésique	Humide	Roche	Autres couverts
Sèche	57.1	7.9	0.0	35.0	0.0
Mésique	34.8	60.1	3.1	2.0	0.0
Humide	0.4	24.9	74.6	0.0	0.0
Roche	4.5	0.1	0.0	95.5	0.0
Autres couverts	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0

Précision moyenne = 77.45%

Précision globale = 96.10%

Nombre de pixels par cartographie végétale :

Type de végétation	NDVI ASTER	SDVI ASTER
végétation sèche	780 229	567 768
végétation mésique	138 411	119 301
végétation humide	12 447	11 764

## 4.2 Analyses des changements d'échelles

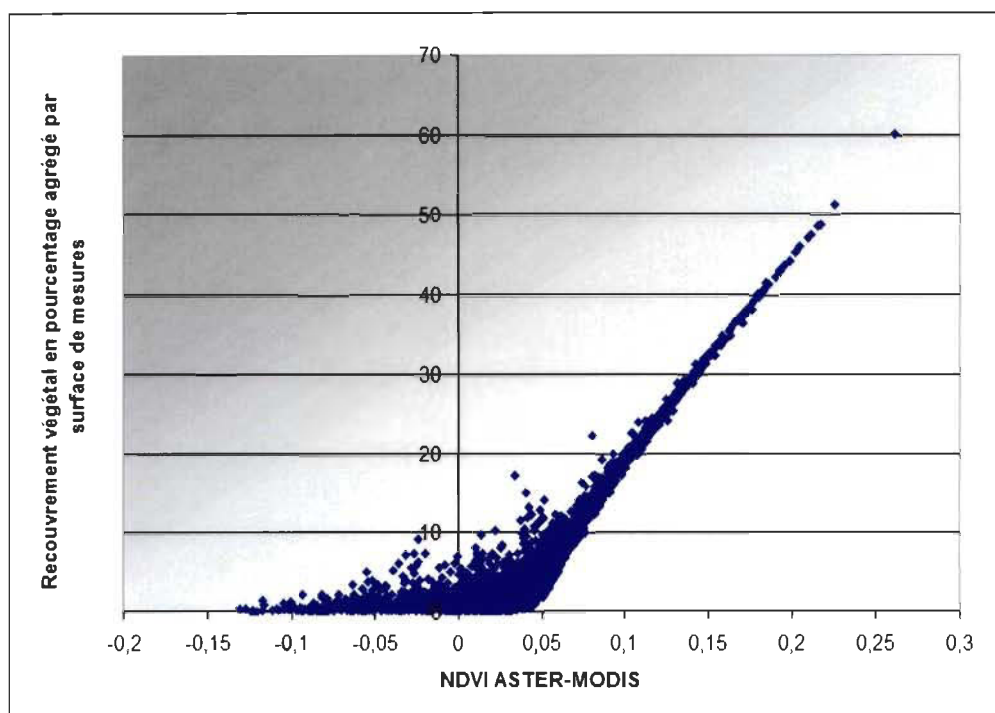
### **4.2.1 Relation entre le recouvrement végétal en pourcentage et ASTER à l'échelle MODIS (image ASTER-MODIS)**

Nous avons fait l'agrégation des variables, calculées avec ASTER, à la résolution spatiale de MODIS. Les nouvelles variables suivantes ont été obtenues pour chaque surface de mesures : le recouvrement végétal en pourcentage agrégé, les proportions des cinq types de couvert agrégés, le NDVI ASTER-MODIS et le SDVI ASTER-MODIS. Seules les surfaces de mesures avec la présence de végétation ont été retenues pour les analyses des changements d'échelles. Les surfaces ne contenant pas de végétation ne

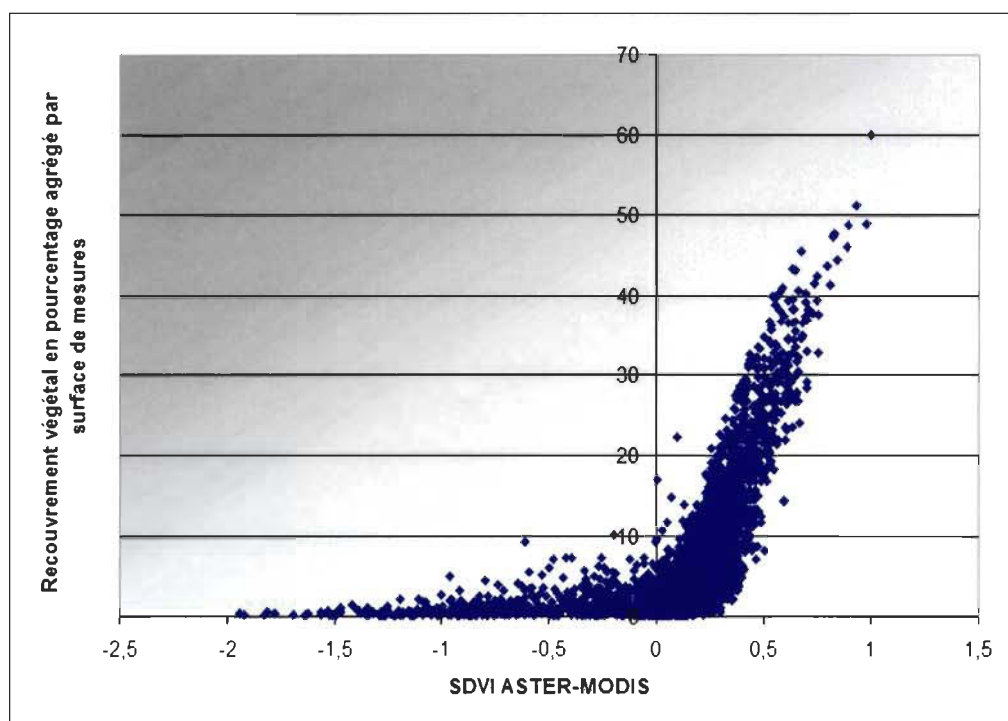
sont pas utiles pour notre analyse car nous étudions la relation entre le recouvrement végétal en pourcentage et les valeurs des indices de végétation (NDVI et SDVI) de l'image ASTER-MODIS.

La validation s'effectue par la comparaison entre les données de NDVI MODIS et de SDVI MODIS à 250 m et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé. Le recouvrement végétal en pourcentage agrégé doit conserver une linéarité avec le NDVI ASTER-MODIS et le SDVI ASTER-MODIS. La relation linéaire du recouvrement végétal en pourcentage agrégé avec le NDVI ASTER-MODIS (Figure 4.6) est meilleure qu'avec le SDVI ASTER-MODIS (Figure 4.7) puisque la variable du recouvrement végétal en pourcentage a été calculée à partir du NDVI ASTER. Nous remarquons néanmoins que suite à l'agrégation, les surfaces de mesures dont le recouvrement végétal en pourcentage agrégé est inférieur à environ 10% présentent des effets dus aux changements d'échelles, la proportion de végétation étant trop faible pour contribuer efficacement à la réponse spectrale. Au-dessus de 10% de végétation, la linéarité est bien conservée entre le recouvrement végétal en pourcentage agrégé et les indices de végétation.





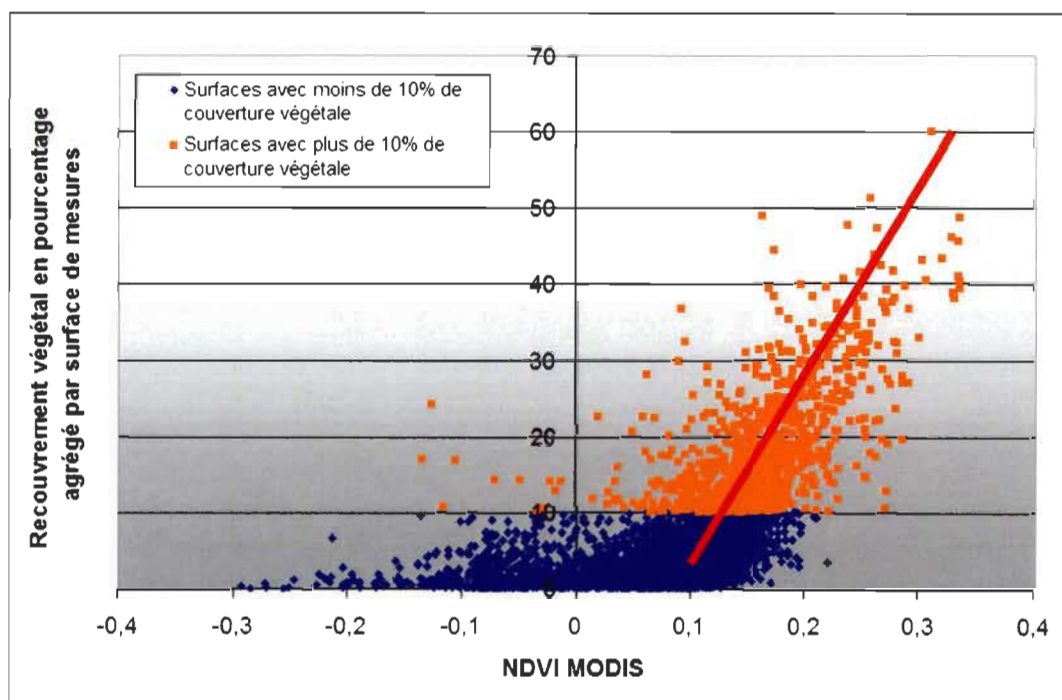
**FIGURE 4.6 :** Analyse de régression linéaire entre le NDVI ASTER-MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé.



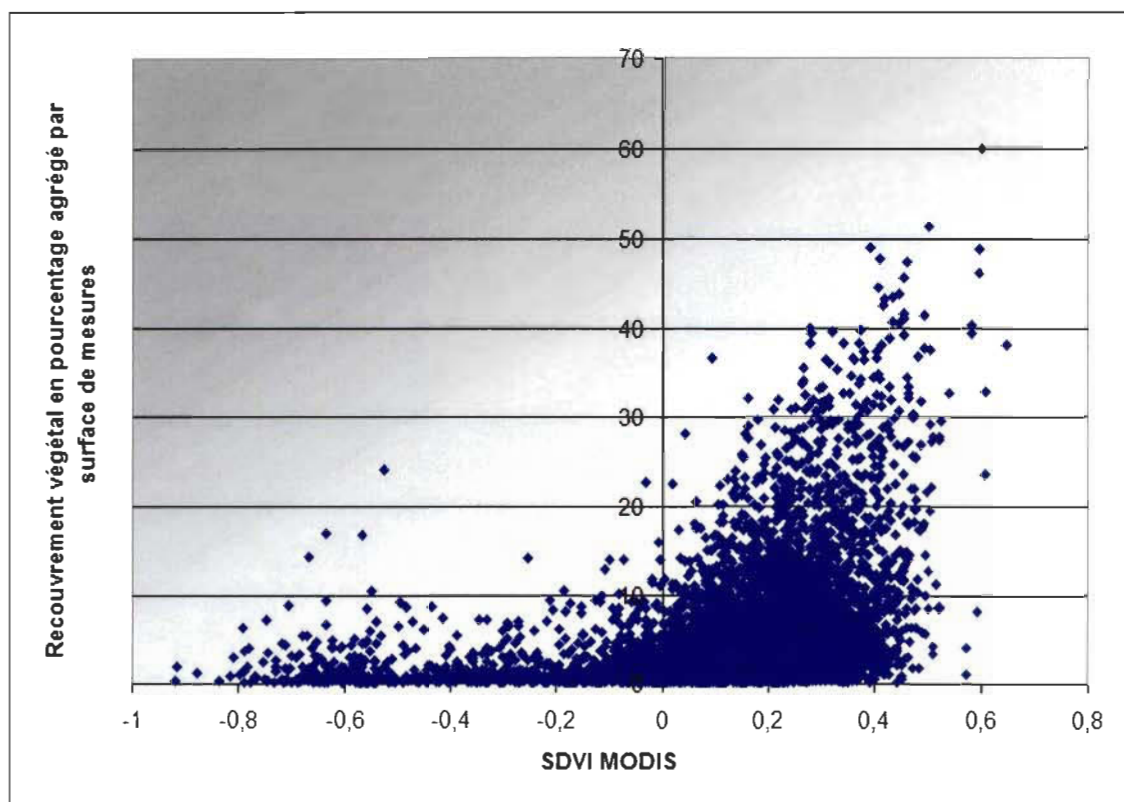
**FIGURE 4.7 :** Analyse de régression linéaire entre le SDVI ASTER-MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé.

## 4.2.2 Relation entre le recouvrement végétal en pourcentage et MODIS

Les résultats montrent que le NDVI MODIS (Figure 4.8) est plus efficace que le SDVI MODIS (Figure 4.9) pour estimer le recouvrement végétal en pourcentage. Le SDVI MODIS ne présente pratiquement aucune relation linéaire, mais plutôt un grand nuage de points dispersé le long d'une droite verticale à partir d'un SDVI égal à zéro. De son côté, le NDVI MODIS conserve une bonne relation linéaire à partir de 10% de recouvrement végétal. Sous 10% de recouvrement végétal, la valeur de NDVI MODIS ne permet pas d'estimer correctement le recouvrement végétal en pourcentage. Néanmoins, le NDVI MODIS estime suffisamment bien le recouvrement végétal en pourcentage pour effectuer une cartographie végétale du col de la vallée de Sverdrup.



**FIGURE 4.8 :** Analyse de régression linéaire entre le NDVI MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé. La ligne rouge est la droite de régression linéaire entre les deux variables et dont la formule est la suivante :  $y = 2,4345x - 0,2242$ .

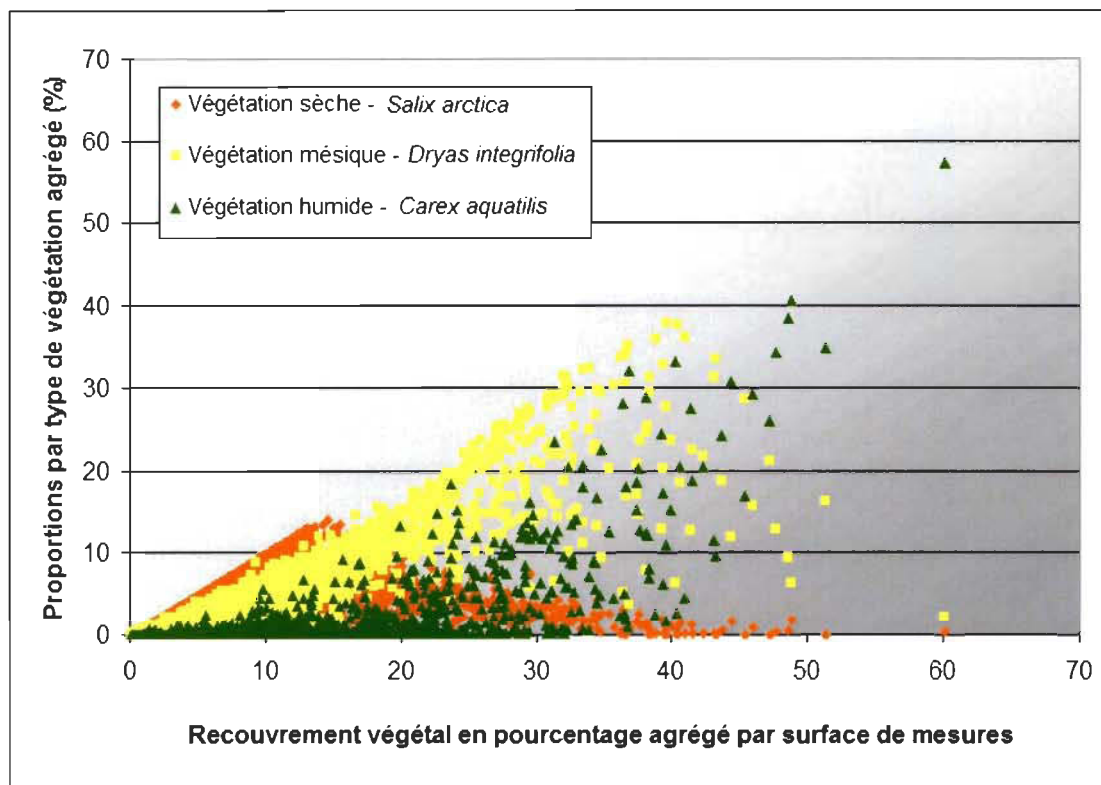


**FIGURE 4.9 :** Analyse de régression linéaire entre le SDVI MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé.

### 4.3 Cartographie végétale avec le NDVI MODIS

En observant la figure 4.10, nous remarquons que plus le recouvrement végétal en pourcentage augmente, 1) plus la proportion de végétation sèche – *Salix arctica* augmente de 0% jusqu'à environ 15% de recouvrement végétal avant de diminuer progressivement; 2) plus la proportion de végétation mésique – *Dryas integrifolia* augmente de 0% jusqu'à environ 40% de recouvrement végétal avant de diminuer peu à peu; 3) et plus la proportion de végétation humide – *Carex aquatilis* augmente de 0% à 20%, puis augmente plus rapidement ensuite. De plus, sauf exception de la végétation sèche – *Salix arctica* qui se retrouve comme seul couvert végétal présent dans quelques surfaces de mesures, les végétations mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex*

*aquatilis* forment toujours des mélanges, dont voici ceux possibles : 1) végétation sèche – *Salix arctica* et végétation mésique – *Dryas integrifolia*, 2) végétation mésique – *Dryas integrifolia* et végétation humide – *Carex aquatilis* ou 3) les trois types de végétation mélangés ensembles.



**FIGURE 4.10 :** Progression des proportions des types de végétation selon le recouvrement végétal en pourcentage agrégé.

À l'échelle MODIS de 250 m, la végétation forme un continuum. Plus le recouvrement végétal en pourcentage augmente, plus les végétations mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex aquatilis* s'intègrent progressivement à la végétation sèche – *Salix arctica*. En observant le continuum de la figure 4.10 et la droite de régression linéaire entre le NDVI MODIS et le recouvrement végétal en pourcentage agrégé de la figure 4.8, cinq classes ont été générées en subdivisant le recouvrement végétal en pourcentage agrégé en cinq intervalles (Tableau 4.3). Au-delà de cinq classes, l'œil humain commence à avoir de la difficulté à distinguer les classes entre-elles (Girard et Girard, 2004). Cinq classes végétales d'intervalles réguliers (par tranche de

10%) suffisent pour généraliser et représenter le continuum végétal de la figure 4.10. Pour chaque classe de recouvrement végétal agrégés, un intervalle NDVI MODIS et les proportions moyennes des types de couvert susceptibles d'être retrouvées par surface de mesures y sont associés. L'écart-type représente l'erreur associée à chacun des types de couvert par intervalle. L'erreur cartographique moyenne associée à la probabilité de retrouver les types de couvert par intervalle est de 6,4%.

**TABEAU 4.3**

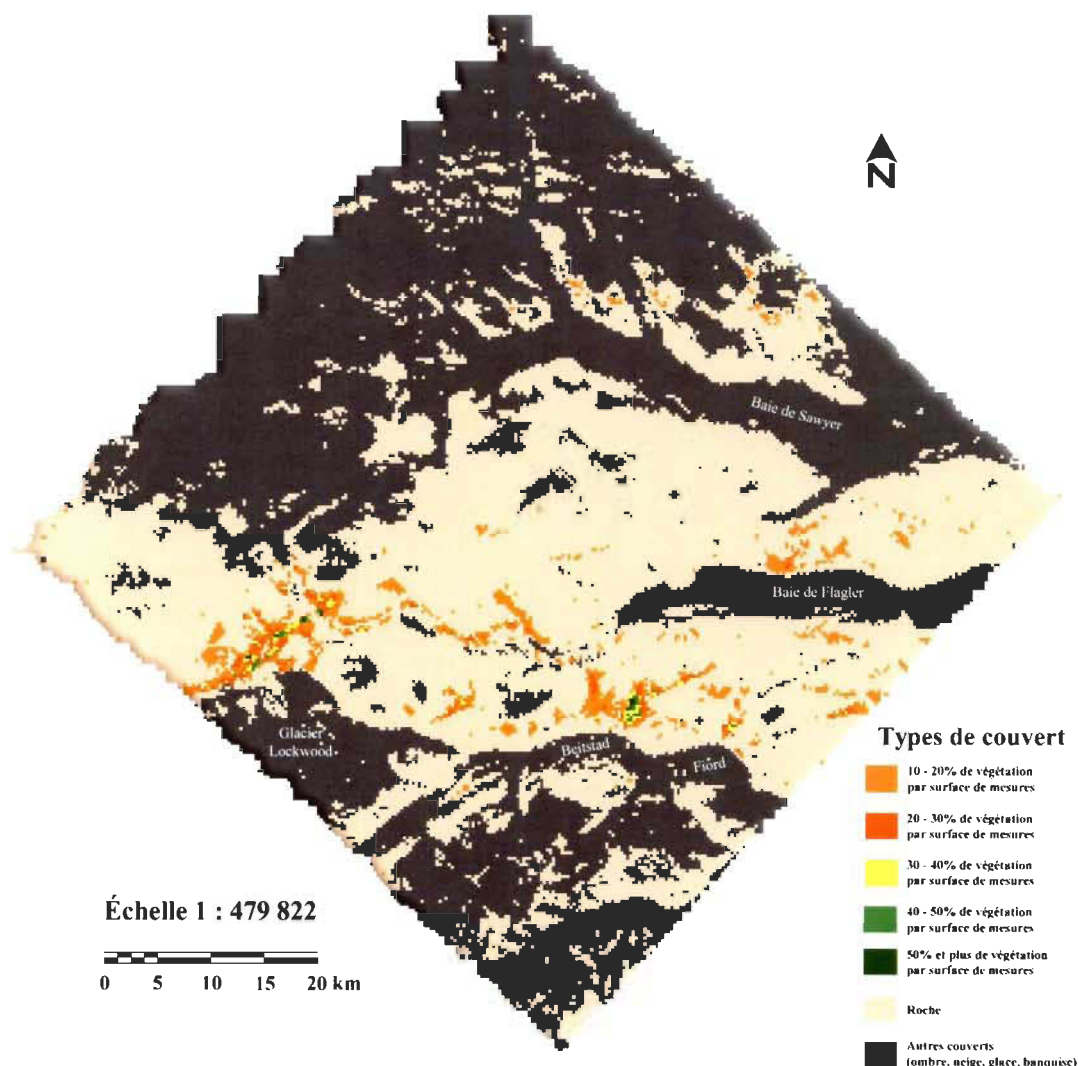
Classes des recouvrements végétaux agrégés en pourcentage de la cartographie végétale produite avec le NDVI MODIS de la figure 4.11.

Classes des recouvrements végétaux agrégés	Intervalles NDVI MODIS	Proportions des types de couvert <sup>1,2</sup>			
			Moyenne		Écart-type
10 - 20 %	0,133 - 0,174	Végétation sèche	4,7	+/-	2,9
		Végétation mésique	2,7	+/-	4,2
		Végétation humide	0,4	+/-	1,9
		Roche	90,5	+/-	9,1
20 - 30 %	0,174 - 0,215	Végétation sèche	5,2	+/-	2,5
		Végétation mésique	10,8	+/-	6,7
		Végétation humide	2,2	+/-	4,0
		Roche	80,8	+/-	7,7
30 - 40 %	0,215- 0,256	Végétation sèche	3,5	+/-	2,3
		Végétation mésique	18,8	+/-	7,9
		Végétation humide	4,6	+/-	6,5
		Roche	72,9	+/-	7,6
40 - 50 %	0,256 - 0,297	Végétation sèche	2,1	+/-	1,8
		Végétation mésique	19,6	+/-	8,4
		Végétation humide	8,8	+/-	10,0
		Roche	68,7	+/-	9,0
50 % et plus	0,297 et plus	Végétation sèche	0,8	+/-	1,0
		Végétation mésique	21,6	+/-	12,3
		Végétation humide	20,5	+/-	15,6
		Roche	57,0	+/-	6,2
Écart-type moyen :					6.4%
(erreur cartographique)					

<sup>1</sup> Proportions moyennes des types de couverts susceptibles d'être retrouvées par surface de mesures

<sup>2</sup> La proportion des autres couverts (neige, glace, banquise, ombre) est négligeable au-dessus de 10% de végétation (proportion < 0,02%) et ne figurent donc pas dans le tableau

À partir de ces intervalles, nous avons produit la cartographie végétale avec le NDVI MODIS du col de la vallée de Sverdrup (Figure 4.11). Cette cartographie végétale montre les principaux endroits à hautes concentrations de végétation, dont la zone d'étude détaillée de Bergeron (1988) juste au nord du glacier Lockwood et la deuxième zone avec le plus de végétation juste au nord de Beitstad Fiord.



**FIGURE 4.11 :** Cartographie végétale produite avec le NDVI MODIS du col de la vallée de Sverdrup, île d'Ellesmere.

## CHAPITRE 5

### DISCUSSION

Les milieux en Arctique caractérisés par la présence de végétation se composent généralement de surfaces hétérogènes pour lesquelles le couvert végétal se mélange avec divers couverts, particulièrement celui de la roche. L'étude de la végétation arctique par télédétection est récente et les outils disponibles doivent être validés, tels que l'indice de végétation normalisé (NDVI). La validation permet de connaître l'efficacité de leur application pour la cartographie végétale en Arctique, surtout lorsque certaines études doutent de la précision du NDVI en raison des effets de changements d'échelles et de la présence de pixels mixtes. En plus d'effectuer une cartographie végétale avec MODIS, cette étude se penche sur la validation du NDVI à l'échelle de MODIS et d'un autre indice de végétation, l'indice de végétation d'échelle (SDVI) proposé par Jiang *et al.* (2006), un indice plus efficace selon cette étude. Le SDVI varie de façon indépendante des changements d'échelles et de la présence des pixels mixtes.

#### 5.1 Calculs des variables et cartographies végétales à l'échelle de ASTER

La seule cartographie bien documentée existante du col de la vallée de Sverdrup sur l'île d'Ellesmere est celle de Bergeron (1988) et notre étude s'appuie sur une cartographie détaillée qu'il a produite, dont sa zone d'étude est située au nord-ouest du glacier Lockwood. Les résultats des figures 4.1 et 4.2 confirment qu'une bonne relation peut être établie entre les recouvrements végétaux en pourcentage et les valeurs des deux indices de végétation. Selon la disposition des sites d'échantillonnage dans ces figures, nous constatons que plus la végétation occupe d'espace dans un pixel de l'image



ASTER, plus les réponses spectrales en termes de NDVI ou SDVI suivent une augmentation linéaire à celle de la proportion de végétation.

Les valeurs de recouvrement végétal en pourcentage des sites 33 (mésique – *Dryas integrifolia*) et 42 (sèche – *Salix arctica*) ne se retrouvent pas dans la zone végétale correspondant à leur taux d'humidité. Le site 33 se retrouve dans la zone de végétation sèche – *Salix arctica* et le site 42 se retrouve dans la zone de végétation humide – *Carex aquatilis*. L'estimation par ASTER des valeurs des indices de végétation est juste car les sites 33 et 42 suivent la tendance de l'équation de la régression linéaire entre les valeurs des indices de végétation et celle du recouvrement végétal en pourcentage des sites de Bergeron (1988). Ces sites représentent des exceptions car les recouvrements végétaux en pourcentage recueillis par Bergeron (1988) ne correspondent pas à des valeurs normalement échantillonnées pour ces types de sites. Ceci s'explique en considérant le régime d'humidité de ces sites. Dans le cas du site 33 a un recouvrement végétal en pourcentage plus faible que les autres sites de végétation mésique – *Dryas integrifolia*. Le régime d'humidité des sites de végétation mésique – *Dryas integrifolia* est généralement de type mésique, c'est-à-dire que le sol reste humide durant plus de la moitié de la saison de croissance (Bergeron, 1988). Le régime d'humidité du site 33 est de type xérique-mésique, c'est-à-dire que le sol est légèrement humide au début de la saison de croissance, mais reste sec durant la majeure partie de la saison de croissance (Bergeron, 1988). Dans le cas du site 42 a un recouvrement végétal en pourcentage plus élevé que les autres sites de végétation sèche – *Salix arctica*. Le régime d'humidité des sites de végétation sèche – *Salix arctica* est généralement de type xérique (type de sol montrant de sévère déficit en eau durant la saison de croissance) ou de type xérique-mésique (Bergeron, 1988). Le régime d'humidité du site 42 est de type mésique.

Nous remarquons également que selon l'augmentation du recouvrement végétal en pourcentage, le type de végétation passe progressivement d'un type sec à mésique et



à humide ensuite. Ces résultats permettent de confirmer ceux similaires mesurés par d'autres études arctiques (Stow *et al.*, 1993; Walker *et al.*, 1995; Rees *et al.*, 1998). Les résultats des matrices de correspondances entre les classes de Bergeron (1988) et les indices de végétation (NDVI et SDVI) du tableau 4.1 montrent bien que les tendances des figures 4.1 et 4.2 peuvent être généralisées à une partie significative de la cartographie de Bergeron (1988). En effet, ceci se fait sans introduire d'erreurs significatives lorsque différents seuils sont générés à partir du NDVI ou du SDVI et permet de créer trois types de végétation (sèche – *Salix arctica*, mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex aquatilis*). Ces résultats confirment le gradient conceptuel de l'humidité du sol de Walker *et al.* (2005) selon lequel ce facteur environnemental contrôle la répartition de la végétation en fonction de la topographie. Il est intéressant de noter que, selon le tableau 4.1, le couvert humide – *Carex aquatilis* est plus facilement détecté par les deux indices de végétation de ASTER que le couvert mésique – *Dryas integrifolia*, et ce dernier l'est également plus que le couvert de végétation sèche – *Salix arctica*. La végétation devient progressivement humide plus les recouvrement végétaux en pourcentage deviennent élevés. En augmentant, la végétation contribue davantage à la réponse spectrale du pixel au détriment du couvert de la roche. Nous avons ici une faible manifestation des effets de changement d'échelle entre l'étude de Bergeron (1988) et l'image ASTER occasionnés par la présence de la roche. En effet, la présence du fond de scène, soit la roche, a tendance à décroître plus que le recouvrement végétal en pourcentage augmente. Plus le recouvrement de roche est élevé dans le pixel, plus les erreurs générées par la roche sont importantes. Le capteur ASTER n'arrive pas à discriminer efficacement les pixels constitués de roche homogène (pixels ASTER avec 100% de roche) avec ceux constitués d'un mélange de végétation et de roche. La limite entre la végétation sèche – *Salix arctica* et la roche homogène est la discrimination la plus difficile pour ASTER. Nous avons débuter notre classe de végétation sèche – *Salix arctica* à 10% de couvert végétal dans le cas du NDVI et à 8% dans celui du SDVI afin d'éviter une surestimation de la végétation sèche – *Salix arctica* dans le col de la vallée de Sverdrup.

La comparaison entre les cartographies produites avec le NDVI ASTER et le SDVI est présentée par le tableau 4.2. Plus le recouvrement végétal en pourcentage augmente, plus la ressemblance entre les deux cartographies est grande. La différence est grande lorsque le recouvrement végétal en pourcentage est faible car la présence élevée de roche rend plus difficile la détection de la végétation par ASTER. De plus, le NDVI ASTER a classé un plus grand nombre de pixels que le SDVI ASTER pour chacun des types de végétation, ce qui veut dire que le NDVI ASTER surestime la proportion de végétation par rapport au SDVI ASTER pour l'ensemble du col de la vallée de Sverdrup. Le SDVI détecte moins de végétation que le NDVI. Le calcul du NDVI incorpore un élément de normalisation qui réduit les effets d'éclairement ou de pente qui rendent plus difficile la détection de la végétation, tandis que le SDVI n'inclut pas cette normalisation. Or, nous savons que les caractéristiques spectrales (réflectances exo-atmosphériques) de certains types de végétation en Arctique peuvent varier selon la localisation en raison de l'illumination, du terrain et des conditions climatiques (Laidler et Treitz, 2003).

## 5.2 Analyses des changements d'échelles

Les deux premières régressions linéaires servent à étudier les effets de l'agrégation des variables de l'image ASTER vers la résolution spatiale de MODIS afin de savoir si la relation est linéaire entre le recouvrement végétal en pourcentage agrégé et le NDVI ASTER-MODIS et le SDVI ASTER-MODIS. Les figures 4.6 et 4.7 indiquent que la relation devient linéaire autour de 10% de recouvrement végétal par surface de mesures. Ceci s'explique par la présence de la roche ou des autres couverts qui génèrent des effets de changements d'échelles lors de l'agrégation. Un écart existe entre les valeurs du recouvrement végétal en pourcentage agrégées et les valeurs des indices de végétation agrégées. Cet écart est causé par la différence entre le domaine de valeurs du recouvrement végétal en pourcentage agrégé et le domaine de valeurs des

indices de végétation. L'étendue de valeurs possibles pour l'agrégation du recouvrement végétal en pourcentage inclut des valeurs allant de 0 (absence de végétation) jusqu'à un maximum de 0,957 (i.e. 95,7% de végétation). Ainsi, lorsque le recouvrement végétal en pourcentage est supérieur à 0 pour un pixel ASTER, la valeur correspondante en termes de NDVI ou SDVI pour ce même pixel est proportionnelle à la proportion de végétation contenue dans le pixel, car la valeur des indices de végétation est fonction du recouvrement végétal en pourcentage. Ceci fait en sorte que pour des surfaces de mesures avec plus de 10% de recouvrement végétal, la relation est linéaire entre le recouvrement végétal en pourcentage agrégé et le NDVI ASTER-MODIS ou le SDVI ASTER-MODIS, car la majorité des pixels ASTER sont composés de végétation. Toutefois, lorsque le recouvrement végétal en pourcentage est égal 0 pour un pixel ASTER, les valeurs de NDVI ou de SDVI correspondant sont multiples et ne sont pas fonction du recouvrement végétal en pourcentage. En effet, à 0% de végétation, le pixel ASTER est composé de roche homogène et/ou un autre couvert (ombre, neige, glace, banquise) pour lesquels les valeurs possibles vont de -0,57 à 0,0599 pour le NDVI ASTER et de -1,43 à 0,119 pour le SDVI ASTER. Ceci fait en sorte que pour des surfaces de mesures avec moins de 10% de recouvrement végétal, la proportion de végétation n'est pas suffisante par rapport à la proportion de roche homogène ou des autres couverts pour influencer le calcul des valeurs du NDVI ASTER-MODIS et du SDVI ASTER-MODIS.

L'étude de Price (1990) suggère que la relation n'est pas linéaire entre le NDVI d'une image AVHRR et le recouvrement végétal en pourcentage en raison de la présence de pixels mixtes. Jiang *et al.* (2006) démontre que pour des surfaces hétérogènes, la résolution spatiale a un impact important sur les valeurs de NDVI et que les NDVI à diverses échelles peuvent ne pas être comparables, notamment à cause de la présence de roche dans les pixels mixtes. Nos résultats ne corroborent qu'en partie ceux de Price (1990) et de Jiang *et al.* (2006). Pour le NDVI MODIS (Figure 4.8), les surfaces de mesures avec moins de 10% de recouvrement végétal ne montrent aucune relation avec le recouvrement végétal en pourcentage agrégé. Cette relation non linéaire

s'explique par les proportions de roche et des autres couverts trop élevées dans les surfaces de mesures par rapport à la faible proportion de végétation (moins de 10%), condition qui ne permet pas au NDVI MODIS de détecter efficacement la végétation. Cependant, lorsque les surfaces de mesures contiennent plus de 10% de recouvrement végétal, la relation est linéaire entre le recouvrement végétal en pourcentage agrégé et le NDVI MODIS. Ces différences s'expliquent en considérant les résolutions spatiales des images utilisées par chaque étude. En effet, nous utilisons une image MODIS d'une résolution spatiale (250 mètres) moins grossière que les autres études qui utilisent une image AVHRR de 1 km de résolution (Price, 1990; Chen, 1999; Leprieur *et al.*, 2000; Jiang *et al.*, 2006) ou une image MODIS de 500 mètres (Price, 2003). Or, plusieurs chercheurs ont montré que la proportion d'erreurs augmentait progressivement au fur et à mesure que la résolution spatiale devenait plus grossière (Moody et Woodcock, 1994; PaxLenney et Woodcock, 1997; Tian *et al.*, 2002). Ces erreurs sont le résultat du nombre grandissant de pixels mixtes et du degré de complexité des mélanges à l'intérieur des pixels plus la résolution augmente (Tian *et al.*, 2002).

Du côté du SDVI (Figure 4.9), l'étude de Jiang *et al.* (2006) a montré que la relation est linéaire entre les valeurs de cet indice de végétation et les recouvrements végétaux en pourcentage, et qu'il varie de manière indépendante de l'échelle spatiale, c'est-à-dire qu'il est peu affecté par les effets de changements d'échelles. Or, nos résultats du SDVI MODIS ne présentent aucune relation linéaire fiable pour n'importe quelle valeur de recouvrement végétal en pourcentage agrégé. Sous 10% de recouvrement végétal, nous remarquons la même relation non linéaire pour le SDVI MODIS que nous avons avec le NDVI MODIS. Ces différences s'expliquent par le fait que l'étude de Jiang *et al.* (2006) fut réalisée à partir d'un modèle bivarié qui n'inclut que les couverts de la végétation et de la roche, tandis que notre étude est multivariée, incluant des couverts de végétation, de roche, d'ombre, de neige, de glace et de banquise. Les surfaces de mesures multivariées introduisent une composante supplémentaire au modèle bivarié dans l'intégration des différents couverts dans un pixel mixte, car les couverts non végétaux présentent des valeurs de luminosités

différentes de celles de la végétation. Or, plus le mélange du pixel mixte est composé de couverts dont les luminosités sont contrastantes, plus l'intégration pour un pixel mixte sera difficile (Leprieur *et al.*, 2000). La mauvaise performance du SDVI à l'échelle de MODIS est due au paramètre  $DVI_v$  inclus dans la formule du SDVI, paramètre égal à une valeur unique pour l'ensemble de l'image qui représente la végétation. Cette valeur unique est habituellement définie en considérant des pixels dont le contenu est composé à 100% de végétation afin que cette valeur représente un couvert de végétation pure et non un mélange de plusieurs couverts. Or, la détermination de la valeur de ce paramètre de végétation ( $DVI_v$ ) à l'échelle de MODIS est représentée dans notre étude par un mélange de végétation et de roche, car il n'existe aucun pixel MODIS de 250 mètres composé uniquement de végétation. Pour cette raison, le SDVI n'est pas un indice de végétation bien adapté avec l'utilisation d'une image à résolution moyenne telle que MODIS pour un environnement arctique, où la végétation est clairsemée et n'est que de quelques centimètres de hauteur.

### 5.3 Cartographie végétale avec le NDVI MODIS

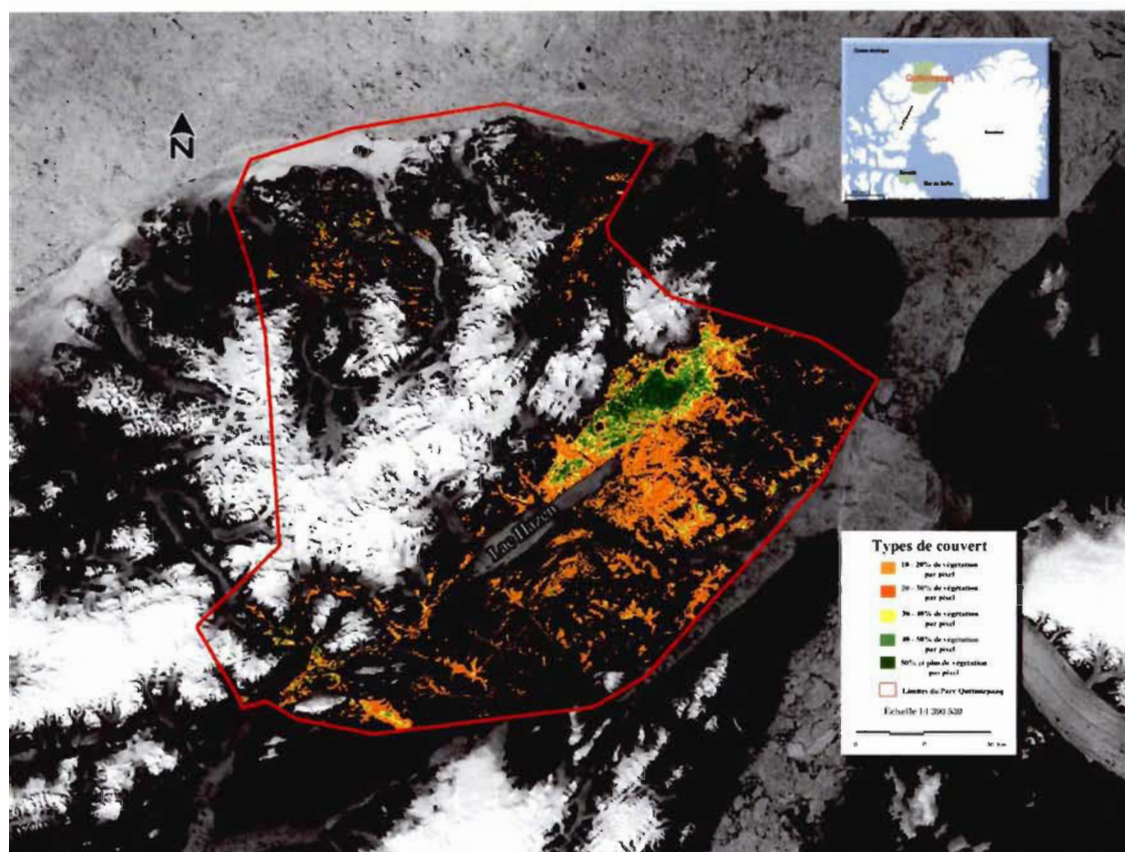
Très souvent, les cartographies produites sur de grands territoires, par exemple le CAVM (Walker *et al.*, 2005), ont tendance à utiliser des classifications qualitatives. Ces classifications décrivent les caractéristiques générales des classes de végétation, telles que les types de plantes ainsi que la délimitation générale de la répartition de la végétation. Ce type de classification est très général sur la végétation. La classification quantitative décrit non seulement les caractéristiques générales des classes de végétation, mais indique également les recouvrements végétaux en pourcentage possibles occupés par les diverses classes pour chaque pixel. La classification quantitative est utile lorsque le territoire comprend une proportion élevée de pixels mixtes et dont la répartition des plantes varie rapidement à petite échelle. Il est alors utile de connaître les proportions des divers couverts qui composent les pixels mixtes ainsi que leurs répartitions. C'est

dans cette optique que notre classification de la cartographie végétale avec le NDVI MODIS présente les proportions prises par chaque couvert par classe de recouvrements végétaux en pourcentage agrégés. Le tableau 4.3 montre que sous 20% de recouvrement végétal, la végétation sèche – *Salix arctica* domine les autres types de végétation et qu’entre 20 et 50% de recouvrement végétal, c’est le type mésique – *Dryas integrifolia* qui domine. Lorsque la végétation constitue plus de 50% de la surface de mesures, les proportions des types de végétation mésique – *Dryas integrifolia* et humide – *Carex aquatilis* sont similaires et plus importantes que le type de végétation sèche – *Salix arctica*. Le couvert de roche est le couvert dominant.

La cartographie végétale produite en utilisant le NDVI MODIS (Figure 4.11) montre les endroits à fortes concentrations de végétation des classes détaillées présentées dans le tableau 4.3. En effet, les plus fortes concentrations de végétation (nord-ouest du glacier Lockwood où se situe la cartographie de Bergeron (1988), nord de Beitstad Fiord) sont détectées par le NDVI MODIS. Les endroits non détectés sont en fait les surfaces de mesures dont les recouvrements végétaux en pourcentage sont inférieurs à 10% de végétation, c’est-à-dire les surfaces où il y a des effets des changements d’échelles. Par exemple, la partie extrême ouest du col de la vallée de Sverdrup, qui montrait plusieurs pixels de végétation sèche – *Salix arctica* avec le NDVI ASTER, montre presque uniquement de la roche avec le NDVI MODIS tandis que d’autres endroits présentent des superficies réduites de végétation avec le NDVI MODIS par rapport au NDVI ASTER (partie nord de la baie de Flagler ainsi qu’entre la baie de Flagler et le Beitstad Fiord). La forte concentration de végétation près des nunataks au nord des cartographies végétales n’est pas réaliste en raison de la présence de la neige. La réflexion diffuse du rayonnement réfléchi de la neige cause une surestimation des valeurs de NDVI MODIS (Beck *et al.*, 2006).

## 5.4 Application future

La problématique de départ était que certaines régions de l'Arctique telles que le parc Quttinirpaaq, au nord de l'île d'Ellesmere, ne sont couvertes que par un faible nombre de capteurs, parmi lesquels MODIS est celui qui offre la meilleure résolution spatiale (250 mètres) sans recourir à une mosaïque pour cartographier la végétation sur l'ensemble du parc. Les classes de recouvrements végétaux en pourcentage agrégés calculés pour notre cartographie végétale avec le NDVI MODIS pourraient être appliqués à la cartographie végétale du parc Quttinirpaaq, puisque le type de végétation et d'environnement y est sensiblement le même que dans la région de Sverdrup (Gould, 1985; Bergeron, 1988). La figure 5.1 présente un exemple de ce que la cartographie végétale du parc Quttinirpaaq donnerait avec le NDVI MODIS en utilisant les mêmes intervalles de recouvrements végétaux en pourcentage agrégés et la même image MODIS que notre étude. Cependant, cette cartographie doit être analysée afin d'en évaluer la précision à partir d'études réalisées dans la région, telles que celle de Gould (1985) dont l'échantillonnage se concentre autour du lac Hazen.



**FIGURE 5.1 :** Cartographie végétale produite avec le NDVI MODIS du parc Quttinirpaaq, île d'Ellesmere.



## CHAPITRE 6

### CONCLUSION

L'Arctique est caractérisé par de faibles valeurs de températures d'air et de sol, un pergélisol, une courte saison de croissance des plantes ainsi qu'une productivité végétale limitée (Stow *et al.*, 2004). Ces facteurs environnementaux ont pour conséquence que les écosystèmes des îles arctiques présentent majoritairement une végétation clairsemée qui ne dépasse pas quelques centimètres et où les écosystèmes arides et semi-arides prédominent (Laidler et Treitz, 2003). L'objectif principal de cette étude est la production d'une cartographie végétale arctique du col de la vallée de Sverdrup, sur l'île d'Ellesmere au Canada, à partir de l'utilisation d'un indice de végétation appliqué à une image MODIS d'une résolution moyenne de 250 mètres. Le NDVI et le SDVI ont été analysés afin de déterminer l'outil le plus efficace avec MODIS.

Nous avons étudié, pour la première fois dans un environnement arctique, les effets associés aux changements d'échelles et à la présence de pixels mixtes pour le NDVI MODIS ainsi que pour le SDVI MODIS. L'analyse des changements d'échelles nécessite l'acquisition de données à fine résolution, lesquelles sont obtenues par l'image ASTER. Nos résultats montrent des relations linéaires entre les valeurs de recouvrement végétal en pourcentage issues des sites d'échantillonnage de Bergeron (1988) et les valeurs des indices de végétation, le NDVI ASTER et le SDVI ASTER. De plus, nous constatons que plus le recouvrement végétal en pourcentage par pixel ASTER augmente, plus la végétation passe d'un type sec (*Salix arctica*) à un type mésique (*Dryas integrifolia*) et ensuite à un type humide (*Carex aquatilis*).

À l'échelle de MODIS, les régressions linéaires entre le recouvrement végétal en pourcentage agrégé et le NDVI ASTER-MODIS ainsi qu'entre le recouvrement végétal en pourcentage agrégé et le SDVI ASTER-MODIS permettent d'étudier les effets d'échelles associés à l'agrégation des variables. Nous remarquons pour des recouvrements végétaux en pourcentage supérieurs à 10% que la relation est linéaire et que l'agrégation n'introduit pas d'effets de changements d'échelles significatifs. Toutefois, en deçà de ce recouvrement végétal en pourcentage, la proportion de végétation n'est pas suffisante par rapport à la roche et aux autres couverts pour influencer le calcul de l'agrégation de la moyenne des pixels ASTER par surfaces de mesures. Sous 10% de recouvrement végétal en pourcentage, aucun des deux indices de végétation ne montre de relation linéaire entre leurs valeurs et celles du recouvrement végétal en pourcentage agrégé. Tout comme à l'échelle de ASTER, la proportion de végétation n'est pas suffisante et la contribution des signatures spectrales individuelles de la roche et des autres couverts à la réponse intégrée du NDVI MODIS ou SDVI MODIS est trop importante pour que l'image MODIS détecte la végétation efficacement. Au-dessus de 10% de végétation, le NDVI MODIS montre une relation linéaire avec le recouvrement végétal en pourcentage tandis que le SDVI MODIS ne montre aucune relation linéaire. Malgré que le SDVI MODIS ait été conçu dans le but de réduire les effets de la roche et ceux des changements d'échelles, il est peu efficace pour estimer le recouvrement végétal en pourcentage agrégé pour n'importe quelle valeur dans un environnement arctique. Le NDVI MODIS est donc mieux adapté à la cartographie végétale d'un environnement arctique, comme le col de la vallée de Sverdrup.

Notre cartographie végétale du col de la vallée de Sverdrup a été produite en utilisant le NDVI MODIS. Cette cartographie végétale permet d'observer et d'identifier les endroits à hautes concentrations de végétation ainsi que les probabilités de retrouver nos trois types de végétation (sèche – *Salix arctica*, mésique – *Dryas integrifolia*, humide – *Carex aquatilis*) le long du col de la vallée de Sverdrup. La cartographie végétale avec le NDVI MODIS a détecté la zone où se situe la carte détaillée de la zone

d'étude de Bergeron (1988) et ses alentours ainsi que la petite zone de végétation au nord de Beitstad Fiord.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aman, A., Randriamanantena, H. P., Podaire, A. et Frouin, R.** (1992). Upscale integration of Normalized Difference Vegetation Index : The problem of spatial heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 326-338.
- Baret, F., Clevers, J. et Steven, M. D.** (1995). The robustness of canopy gap fraction estimations from red and near-infrared reflectances : A comparison of approaches. *Remote Sensing of Environment*, 54(2): 141-151.
- Batten, D. S. et Svoboda, J.** (1994). *Plant communities on the uplands in the vicinity of the Alexandra Fiord lowland*. In: Svoboda, J. et Freedman, B. (eds.), *Ecology of a Polar Oasis : Alexandra Fiord, Ellesmere Island, Canada*. Toronto : Captus University Publications. 286 pages.
- Beck, P. S. A., Atzberger, C., Hogda, K. A., Johansen, B. et Skidmore, A. K.** (2006). Improved monitoring of vegetation dynamics at very high latitudes: A new method using MODIS NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 100(3): 321-334.
- Bergeron, J.-F.** (1988). *Plant communities of Sverdrup Pass (79 degree North), Ellesmere Island, N.W.T., Canada*, mémoire présenté conformément aux exigences en Sciences de l'Université de Toronto, 260 pages.
- Bian, L. et Butler, R.** (1999). Comparing effects of aggregation methods on statistical and spatial properties of simulated spatial data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(1): 73-84.
- Bian, L. et Walsh, S. J.** (1993). Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana. *Professional Geographer*, 45(1): 1-11.
- Bonn, F. et Rochon, G.** (1992). *Précis de télédétection volume 1 : Principes et méthodes*, Sillery : Presses de l'Université du Québec, 485 pages.
- Calloz, R. et Collet, C.** (2001). *Précis de télédétection volume 3 : Traitements numériques d'images de télédétection*, Sillery : Presses de l'Université du Québec, 386 pages.
- Cantin, D.** (1996). *L'utilisation durable des forêts québécoises*, Sainte-Foy : Presses de l'Université Laval, 157 pages.

- CAVM** (2003). *Circumpolar Arctic Vegetation Map (Scale 1 : 7 500 000)*, Anchorage (Alaska) : Conservation of Arctic Flora and Fauna (CAFF), Map no. 1 U.S. Fish and Wildlife Service.
- Chen, J. M.** (1999). Spatial scaling of a remotely sensed surface parameter by contexture. *Remote Sensing of Environment*, 69(1): 30-42.
- Earth Observing System Data Gateway - NASA**, Mise à jour continue, Uniform Resource Locator (URL): <http://redhook.gsfc.nasa.gov/~imswww/pub/imswelcome/> (15 novembre 2005).
- Elmore, A. J., Mustard, J. F., Manning, S. J. et Lobell, D. B.** (2000). Quantifying vegetation change in semiarid environments: Precision and accuracy of spectral mixture analysis and the Normalized Difference Vegetation Index. *Remote Sensing of Environment*, 73(1): 87-102.
- Girard, M.-C. et Girard, C. M.** (2004). *Traitement des données de télédétection*, Paris : Dunod, 529 pages.
- Gong, P., Miller, J. R. et M., S.** (1994). Forest canopy closure from classification and spectral unmixing of scene components - multisensor evaluation of an open canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5): 1067-1080.
- Google Maps**, Mise à jour continue, Uniform Resource Locator (URL): <http://maps.google.ca/> (12 avril 2008).
- Gould, J. A.** (1985). *Plant communities of the Lake Hazen area, Ellesmere Island, NWT.*, thèse de doctorat présentée conformément aux exigences en Sciences de l'Université de Toronto, département de botanique, 325 pages.
- Gould, W. A., Edlund, S., Zoltai, S., Reynolds, M., Walker, D. A. et Maier, H.** (2002). Canadian Arctic vegetation mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 23(21): 4597-4609.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat - GIEC**, Rapport de synthèse du bilan 2007 des changements climatiques, 114 pages, Uniform Resource Locator (URL): <http://www.ipcc.ch/languages/french.htm> (18 mars 2008).
- Hay, G. J., Marceau, D. J., Dube, P. et Bouchard, A.** (2001). A multiscale framework for landscape analysis: Object-specific analysis and upscaling. *Landscape Ecology*, 16(6): 471-490.

- Hinzman, L. D., Bettez, N. D., Bolton, W. R., Chapin, F. S., Dyurgerov, M. B., Fastie, C. L., Griffith, B., Hollister, R. D., Hope, A., Huntington, H. P., Jensen, A. M., Jia, G. J., Jorgenson, T., Kane, D. L., Klein, D. R., Kofinas, G., Lynch, A. H., Lloyd, A. H., McGuire, A. D., Nelson, F. E., Oechel, W. C., Osterkamp, T. E., Racine, C. H., Romanovsky, V. E., Stone, R. S., Stow, D. A., Sturm, M., Tweedie, C. E., Vourlitis, G. L., Walker, M. D., Walker, D. A., Webber, P. J., Welker, J. M., Winker, K. et Yoshikawa, K. (2005).** Evidence and implications of recent climate change in northern Alaska and other Arctic regions. *Climatic Change*, 72(3): 251-298.
- Hirata, M., Koga, N., Shinjo, H., Fujita, H., Gintzburger, G. et Miyazaki, A. (2001).** Vegetation classification by satellite image processing in a dry area of north-eastern Syria. *International Journal of Remote Sensing*, 22(4): 507-516.
- Hudak, A. T. et Wessman, C. A. (1998).** Textural analysis of historical aerial photography to characterize woody plant encroachment in South African savanna. *Remote Sensing of Environment*, 66(3): 317-330.
- Hurcom, S. J., Harrison, A. R. et Taberner, M. (1996).** Assessment of biophysical vegetation properties through spectral decomposition techniques. *Remote Sensing of Environment*, 56(3): 203-214.
- Hurcom, S. J. et Harrison, A. R. (1998).** The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 19(16): 3109-3125.
- Jia, G. J., Epstein, H. E. et Walker, D. A. (2002).** Spatial characteristics of AVHRR-NDVI along latitudinal transects in northern Alaska. *Journal of Vegetation Science*, 13(3): 315-326.
- Jiang, Z. Y., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y. H., Li, J., Yan, G. J. et Zhang, X. Y. (2006).** Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3): 366-378.
- Kleinbaum, D.G., Kupper, L.L. et Muller, K.E. (1998).** *Applied regression analysis and other multivariable methods*, Toronto : Duxbury Press, 798 pages.
- Laidler, G. J. et Treitz, P. (2003).** Biophysical remote sensing of Arctic environments. *Progress in Physical Geography*, 27(1): 44-68.
- Leprieur, C., Kerr, Y. H., Mastorchio, S. et Meunier, J. C. (2000).** Monitoring vegetation cover across semi-arid regions: Comparison of remote observations from various scales. *International Journal of Remote Sensing*, 21(2): 281-300.
- Liu, H. Q. et Huete, A. (1995).** A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(2): 457-465.

- Moody, A. et Woodcock, C. E.** (1994). Scale-dependent errors in the estimation of land-cover proportions - implications for global land-cover datasets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(5): 585-594.
- Muc, M., Freedman, B. et Svoboda, J.** (1994). *Vascular plant communities of a polar oasis at Alexandra Fiord, Ellesmere Island*. In: Svoboda, J. et Freedman, B. (eds.), *Ecology of a Polar Oasis : Alexandra Fiord, Ellesmere Island, Canada*. Toronto : Captus University Publications. 286 pages.
- Olthof, I. et Fraser, R.H.** (2007). Mapping northern land cover fractions using Landsat ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 107(3): 496-509.
- PaxLenney, M. et Woodcock, C. E.** (1997). The effect of spatial resolution on the ability on to monitor the status of agricultural lands. *Remote Sensing of Environment*, 61(2): 210-220.
- Price, J. C.** (1990). Using spatial context in satellite data to infer regional scale evapotranspiration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28: 940-948.
- Price, J. C.** (2003). Comparing MODIS and ETM+ data for regional and global land classification. *Remote Sensing of Environment*, 86(4): 491-499.
- Ranson, K. J., Sun, G., Kharuk, V. I. et Kovacs, K.** (2004). Assessing tundra-taiga boundary with multi-sensor satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 93(3): 283-295.
- Rees, W. G., Golubeva, E. I. et Williams, M.** (1998). Are vegetation indices useful in the Arctic? *Polar Record*, 34: 333-336.
- Robin, M.** (2002). *Télédétection : Des satellites aux SIG*, Paris : Nathan, 2e édition, 318 pages.
- Stow, D. A., Burns, B. H. et Hope, A. S.** (1993). Spectral, spatial and temporal characteristics of Arctic tundra reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 14: 2445-2462.
- Stow, D. A., Hope, A., McGuire, D., Verbyla, D., Gamon, J., Huemmrich, F., Houston, S., Racine, C., Sturm, M., Tape, K., Hinzman, L., Yoshikawa, K., Tweedie, C., Noyle, B., Silapaswan, C., Douglas, D., Griffith, B., Jia, G., Epstein, H., Walker, D., Daeschner, S., Petersen, A., Zhou, L. M. et Myneni, R.** (2004). Remote sensing of vegetation and land-cover change in Arctic tundra ecosystems. *Remote Sensing of Environment*, 89(3): 281-308.

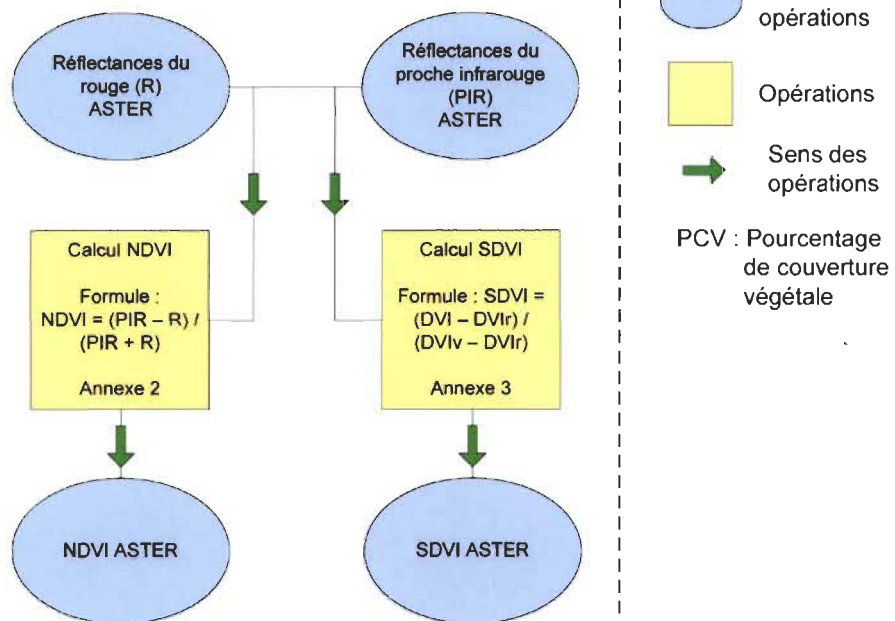
- Tian, Y. H., Woodcock, C. E., Wang, Y. J., Privette, J. L., Shabanov, N. V., Zhou, L. M., Zhang, Y., Buermann, W., Dong, J. R., Veikkanen, B., Hame, T., Andersson, K., Ozdogan, M., Knyazikhin, Y. et Myneni, R. B.** (2002). Multiscale analysis and validation of the MODIS LAI product - I. Uncertainty assessment. *Remote Sensing of Environment*, 83(3): 414-430.
- Turner, M. G., O'Neill, R., Gardner, R. H. et Milne, B. T.** (1989). Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 3(3-4): 153-162.
- Van der Meer, F. et De Jong, S. M.** (2000). Improving the results of spectral unmixing of Landsat Thematic Mapper imagery by enhancing the orthogonality of end-members. *International Journal of Remote Sensing*, 21(15): 2781-2797.
- Verstraete, M. M. et Pinty, B.** (1991). The potential contribution of satellite remote sensing to the understanding of arid lands processes. *Vegetation*, 91: 59-72.
- Walker, D. A., Auerbach, N. A. et Shippert, M. M.** (1995). NDVI, biomass, and landscape evolution of glaciated terrain in northern Alaska. *Polar Record*, 31: 169-178.
- Walker, D. A., Gould, W. A., Maier, H. A. et Raynolds, M. K.** (2002). The Circumpolar Arctic vegetation map: AVHRR-derived base maps, environmental controls, and integrated mapping procedures. *International Journal of Remote Sensing*, 23(21): 4551-4570.
- Walker, D. A., Raynolds, M. K., Daniels, F. J. A., Einarsson, E., Elvebakk, A., Gould, W. A., Katenin, A. E., Kholod, S. S., Markon, C. J., Melnikov, E. S., Moskalenko, N. G., Talbot, S. S. et Yurtsev, B. A.** (2005). The Circumpolar Arctic vegetation map. *Journal of Vegetation Science*, 16(3): 267-282.



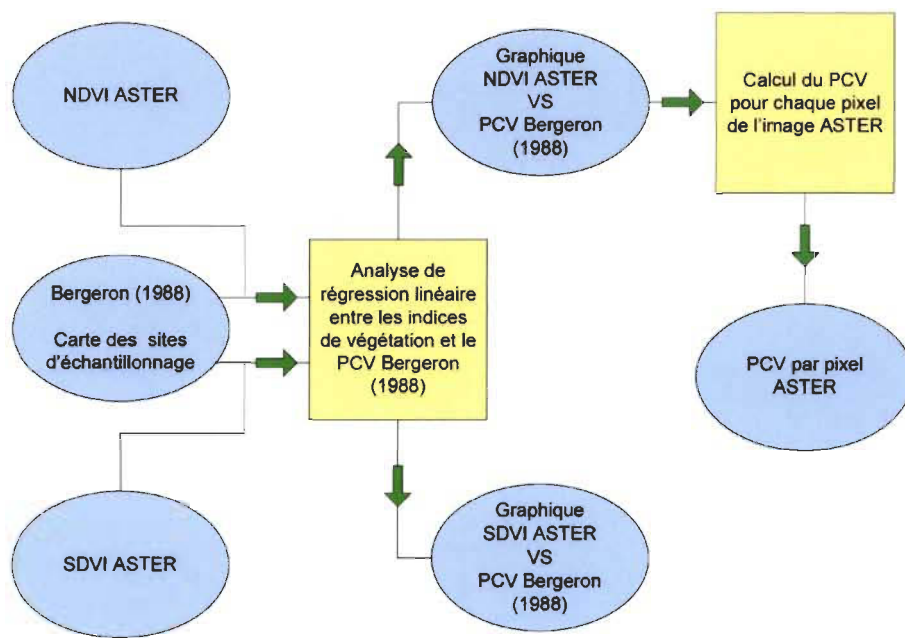
# ANNEXES 1

## Schéma des étapes de la méthodologie

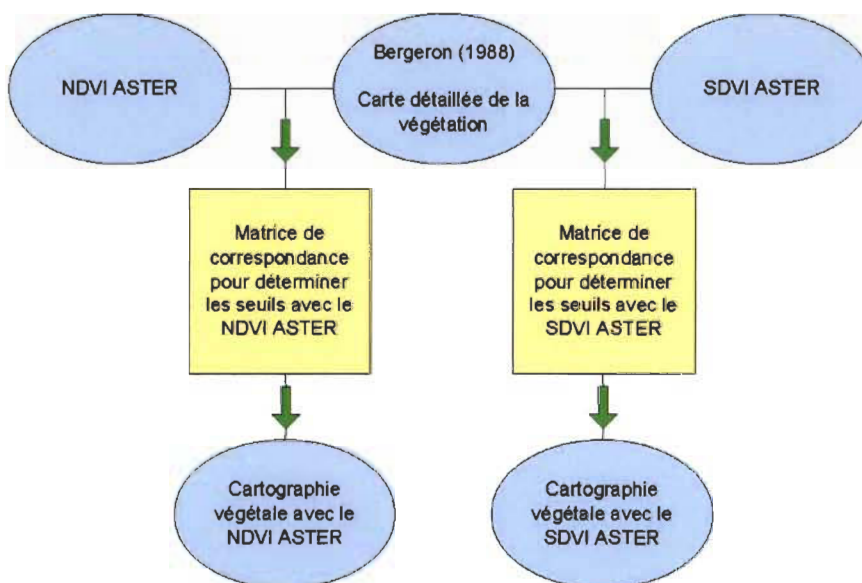
### 1. Calculs du NDVI ASTER et SDVI ASTER



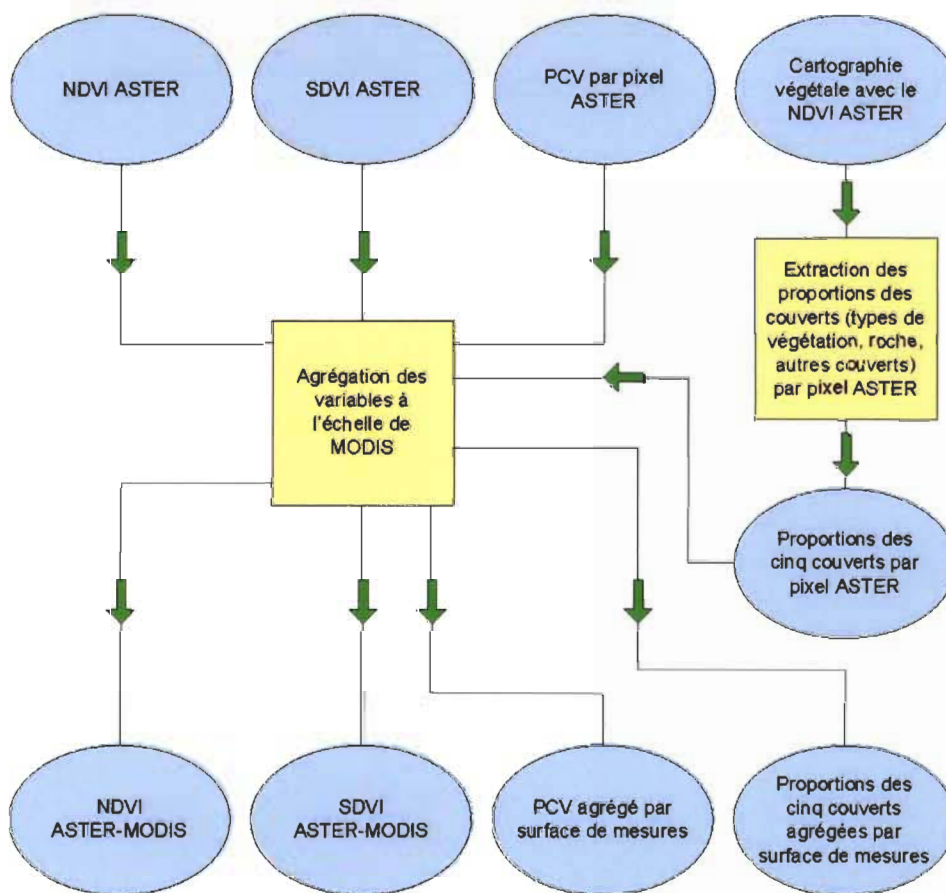
### 2. Relation entre Bergeron (1988) et ASTER (calcul du pourcentage de couverture végétale) – Section 3.4.1



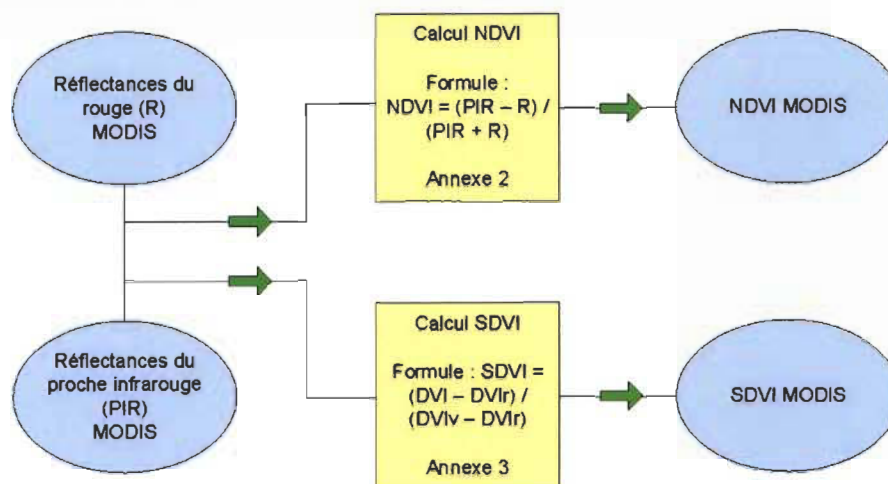
### 3. Seuils des types de végétation et cartographies végétales avec ASTER (NDVI et du SDVI) – Section 3.4.2



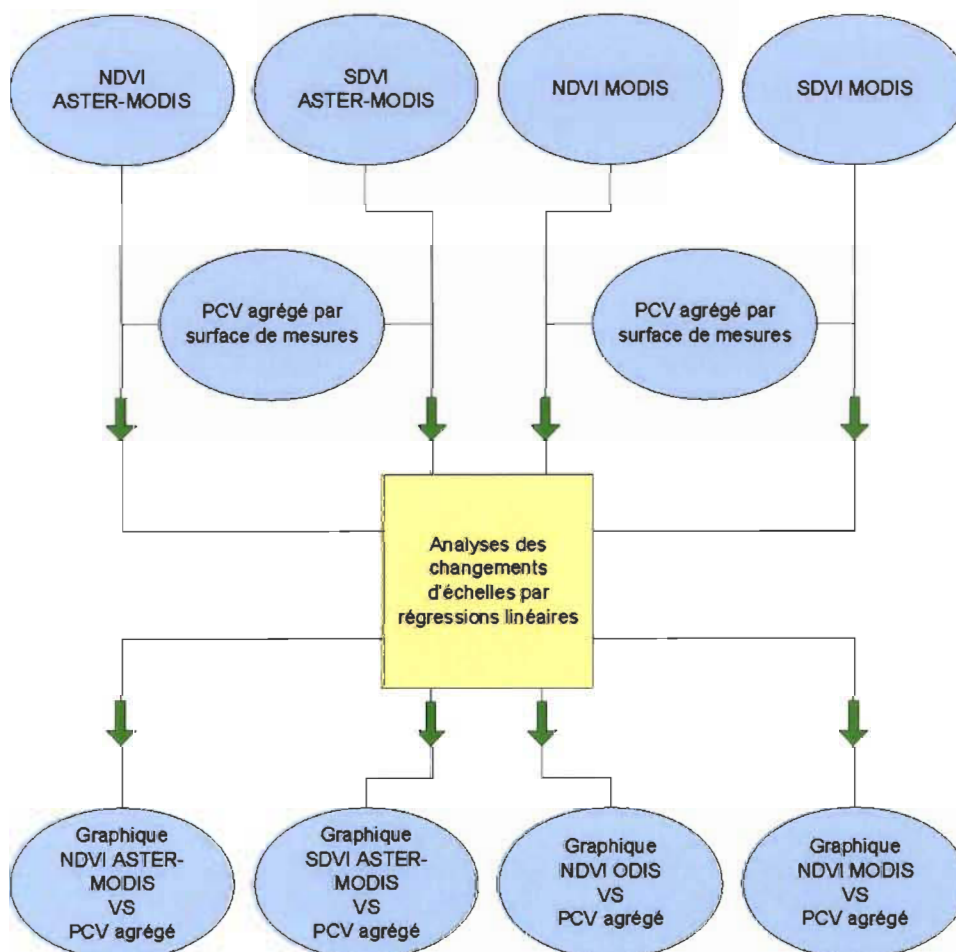
### 4. Agrégation des variables à l'échelle de MODIS – Section 3.5



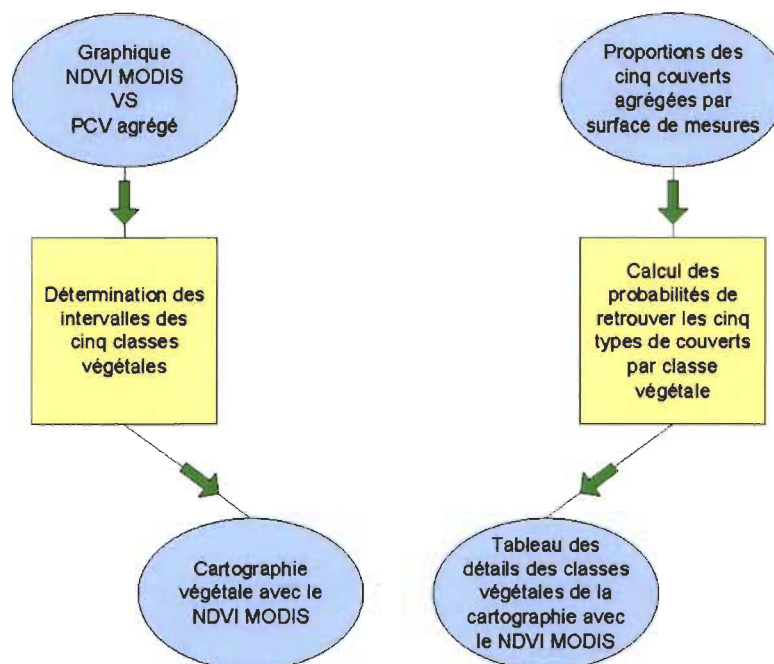
### 5. Calculs du NDVI MODIS et du SDVI MODIS



### 6. Analyses des changements d'échelles – Section 3.5



## 7. Cartographie végétale avec le NDVI MODIS – Section 3.6



## ANNEXE 2

### Calculs des réflectances des bandes du rouge et du proche infrarouge pour les images ASTER et MODIS

Formule générale de la réflectance :

$$\rho_k = (\pi (u_t)^2 L_{ap,k}) / (\cos \Theta_s E_{ap,k})$$

#### ASTER :

##### Bande Rouge

$u_t = 1,01698$  (facteur de correction pour la distance Terre-Soleil du 4 juillet 2003)

$L_{ap,k} = (DN-1)*1,415$

$\Theta_s$  = fichier image de l'angle zénithal solaire

$E_{ap,k} = 1559,05 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$

##### Bande Proche infrarouge

$u_t = 1,01698$  (facteur de correction pour la distance Terre-Soleil du 4 juillet 2003)

$L_{ap,k} = (DN-1)*0,862$

$\Theta_s$  = fichier image de l'angle zénithal solaire

$E_{ap,k} = 1097,51 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$

#### MODIS :

##### Bande Rouge

$u_t = 1,01698$  (facteur de correction pour la distance Terre-Soleil du 4 juillet 2003)

$L_{ap,k} = DN*0,0269667$

$\Theta_s$  = fichier image de l'angle zénithal solaire

$E_{ap,k} = 1606,17 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$

##### Bande Proche infrarouge

$u_t = 1,01698$  (facteur de correction pour la distance Terre-Soleil du 4 juillet 2003)

$L_{ap,k} = DN*0,0103532$

$\Theta_s$  = fichier image de l'angle zénithal solaire

$E_{ap,k} = 992,20 \text{ W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$

## **ANNEXE 3**

### **Calcul de l'indice de végétation d'échelle (SDVI) pour les images ASTER et MODIS**

Formule générale pour le SDVI :

$$\text{SDVI} = (\text{DVI} - \text{DVI}_r) / (\text{DVI}_v - \text{DVI}_r)$$

#### **ASTER**

DVI = Valeur de la différence entre la bande du proche infrarouge et du rouge par pixel de l'image ASTER

$$\text{DVI}_r = 0,01$$

$$\text{DVI}_v = 0,191641$$

#### **MODIS**

DVI = Valeur par pixel de la différence entre la bande du proche infrarouge et du rouge par pixel de l'image MODIS

$$\text{DVI}_r = 0,003716$$

$$\text{DVI}_v = 0,095603$$